



**I Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem
Turma 2011 - CTA DEMEC-TC/UFPR**

EDENILSON CRUZ BOTELHO

**A INFLUÊNCIA DO TEOR DE CO₂ NA MISTURA DE GÁS DE
PROTEÇÃO EM SOLDAGEM GMAW PULSADO NA GERAÇÃO DE
RESPINGOS**

CURITIBA-PR

2013

EDENILSON CRUZ BOTELHO

**A INFLUÊNCIA DO TEOR DE CO₂ NA MISTURA DE GÁS DE
PROTEÇÃO EM SOLDAGEM GMAW PULSADO NA GERAÇÃO DE
RESPINGOS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Engenharia da Soldagem do curso de Especialização em Engenharia da Soldagem da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes.

CURITIBA

2013

TERMÔ DE APROVAÇÃO

EDENILSON CRUZ BOTELHO

A INFLUÊNCIA DO TEOR DE CO₂ NA MISTURA DE GÁS DE PROTEÇÃO EM SOLDAGEM GMAW PULSADO NA GERAÇÃO DE RESPINGOS

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Engenharia da Soldagem, área de concentração Fabricação, no Curso de Especialização em Engenharia da Soldagem, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora :



Prof. Dr. Hélio Padilha
UFPR



Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes
UFPR



Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto
UFPR

Curitiba, 31 de outubro de 2013.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Edson Botelho e Ivete da Cruz, pela constante lição de vida, exemplo de perseverança e por ensinar-me a lutar sempre pelos meus objetivos.

A minha esposa Thalita Botelho, por estar ao meu lado em todos esses anos, nos momentos de alegrias e dificuldades, pelo apoio e confiança em mim depositados.

Agradeço aos meus filhos Eduardo Botelho e Emanuel Botelho, que muitas vezes queriam estar junto a mim e por diversos motivos não puderam.

Ao professor Dr. Ramon Sigifredo Cortés Paredes pela orientação neste trabalho e pelos ensinamentos ministrados.

Ao professor Prof. Dr. Paulo Cesar Okimoto, pelos ensinamentos ministrados.

Agradeço à empresa CNH Latin America, e em especial aos colegas e amigos Eliane Paula, Gezereel Souza, Edmilton Dutra e Wellington Carvalho que de alguma forma me ajudaram na realização deste trabalho.

Aos colegas da especialização pelo constante aprendizado durante o nosso convívio.

Aos demais professores e funcionários do curso que, de uma forma ou outra, contribuíram para esta conquista.

RESUMO

O processo MIG/MAG - Arco Pulsado descreve-se como um processo onde o modo de transferência do metal é caracterizado por apresentar sua transferência em queda livre, por alteração da corrente da soldagem entre dois níveis, sendo um nível mais baixo, conhecido como corrente de base e outro nível mais alto, conhecido como corrente de pulso ou pico. As vantagens deste processo são: a transferência metálica sem formação de respingos e uma grande faixa de potência de soldagem. As desvantagens são: o barulho excessivo (decorrente da frequência de pulsação), custo muito mais alto do equipamento e a complexidade de regulação dos parâmetros.

No presente trabalho foi investigada a influência do teor de CO₂ na mistura do gás de proteção com a quantidade de respingos gerados. Para os ensaios foram utilizadas misturas com: 75% Ar e 25% CO₂ – 80% Ar e 20% CO₂ – 85% Ar e 15% CO₂ – 90% Ar e 10% CO₂. Foram mantidos todos os parâmetros de soldagem, sofrendo apenas variação a mistura do gás de proteção.

PALAVRAS CHAVE: Arco Pulsado. Transferência metálica. Respingos.

ABSTRACT

The MIG / MAG - Pulsed Arc is described as a process where the metal transfer mode is characterized by presenting their transfer into freefall, the change between two levels of welding current, and a low level, known as current base and other high level, known as pulse current or peak. The advantages of this process are: metal transfer without spatter and a wide range of welding power. The disadvantages are excessive noise (due to pulse frequency), much higher cost of equipment and complexity of setting parameters. In the present work we investigated the influence of CO₂ content in the gas mixture of protection with the amount of spatter generated. For the tests used were mixtures of: 75% air and 25% CO₂ - 80% air and 20% CO₂ - 85% air and 15% CO₂ - 90% air and 10% CO₂. We kept all the welding parameters, suffering only a variation of the shielding gas mixture.

KEYWORDS: Pulsed Arc. Metal transfer. Splashes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Soldagem GMAW (EBAH, 2013)	13
Figura 3.2 - Equipamento de Soldagem GMAW (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)	13
Figura 3.3 - Stickout (FISCHER, 2011)	14
Figura 3.4 - Representação esquemática do arco elétrico (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)	15
Figura 3.5 - Modos naturais de transferência em GMAW (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)	17
Figura 3.6 - Modo de transferência <i>Curto Circuito</i> (ABS, 2013)	18
Figura 3.7 - Modo de transferência <i>Goticular Projetada</i> (ABS, 2013)	19
Figura 3.8 - Modo de transferência <i>Globular</i> (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)	20
Figura 3.9 - Classificação das fontes transistorizadas (PUSCHNER, 1986)	23
Figura 3.10 - Tocha refrigerada a água (ABS, 2013)	25
Figura 3.11 - Fluxo do gás de proteção (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)	28
Figura 4.1 - Composição Química e Prpriedades Mecânicas do Aço Carbono NBR 6648 – CG21	31
Figura 4.2 - Composição Química do arame ER70S-6.....	31
Figura 4.3 – Propriedades Mecânicas do arame ER70S-6	31
Figura 4.4 – Arame ER70S-6	32
Figura 4.5 – Efeito Pinch	33
Figura 4.6 – Fonte de Soldagem.....	33
Figura 4.7 – Alimentador de arame.....	34
Figura 4.8 – Tocha seca marca Binzel.....	34
Figura 4.9 – Paquímetro	35
Figura 4.10 – Balança de precisão	35
Figura 4.11 – Arame antes da soldagem com mistura 25% CO ₂	38
Figura 4.12 – Chapa antes da soldagem com mistura 25% CO ₂	39
Figura 4.13 – Arame após a soldagem com mistura 25% CO ₂	39
Figura 4.14 – Chapa após a soldagem com mistura 25% CO ₂	40
Figura 4.15 – Chapa teste soldada com mistura 25% CO ₂	40
Figura 4.16 – Arame antes da soldagem com mistura 20% CO ₂	41
Figura 4.17 – Chapa antes da soldagem com mistura 20% CO ₂	41
Figura 4.18 – Arame após a soldagem com mistura 20% CO ₂	42
Figura 4.19 – Chapa após a soldagem com mistura 20% CO ₂	42
Figura 4.20 – Chapa teste soldada com mistura 20% CO ₂	43
Figura 4.21 – Arame antes da soldagem com mistura 15% CO ₂	43
Figura 4.22 – Chapa antes da soldagem com mistura 15% CO ₂	44
Figura 4.23 – Arame após a soldagem com mistura 15% CO ₂	44
Figura 4.24 – Chapa após a soldagem com mistura 15% CO ₂	45
Figura 4.25 – Chapa teste soldada com mistura 15% CO ₂	45
Figura 4.26 – Arame antes da soldagem com mistura 10% CO ₂	46
Figura 4.27 – Chapa antes da soldagem com mistura 10% CO ₂	46
Figura 4.28 – Arame após a soldagem com mistura 10% CO ₂	47
Figura 4.29 – Chapa após a soldagem com mistura 10% CO ₂	47
Figura 4.30 – Chapa teste soldada com mistura 10% CO ₂	48
Figura 5.1 – Macrografia CP- 01	48
Figura 5.2 – Macrografia CP- 02	49
Figura 5.3 – Macrografia CP- 03	50
Figura 5.4 – Macrografia CP- 04	50
Figura 5.5 – Respingos gerados pela soldagem das chapas testes	51
Figura 6.1 – Kaizen realizado após o estudo	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	12
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO GMAW.....	12
3.2	ARCO ELÉTRICO	14
3.3	MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW.....	16
3.3.1	<i>Transferência metálica por curto circuito</i>	<i>17</i>
3.3.2	<i>Transferência metálica goticular</i>	<i>18</i>
3.3.3	<i>Transferência metálica globular</i>	<i>19</i>
3.3.4	<i>Transferência metálica por arco controlado pulsado</i>	<i>20</i>
3.4	SOLDAGEM MIG PULSADO SINÉRGICO.....	21
3.4.1	<i>Fontes de soldagem com arco pulsado</i>	<i>22</i>
3.4.2	<i>Alimentador do arame e tocha de soldagem</i>	<i>24</i>
3.4.3	<i>Seleção de parâmetros para o processo de soldagem GMAW pulsado</i>	<i>26</i>
3.5	GÁS DE PROTEÇÃO.....	27
3.5.1	<i>Características, propriedades e misturas para a soldagem</i>	<i>28</i>
4	MATERIAIS E METODOLOGIA	30
4.1	mATERIAIS USADOS.....	31
4.1.1	<i>Metal de base</i>	<i>31</i>
4.1.2	<i>Metal de adição</i>	<i>31</i>
4.1.3	<i>Gás de proteção</i>	<i>32</i>
4.1.4	<i>Equipamento e técnicas de análise.....</i>	<i>33</i>
4.1.5	<i>Chapas teste</i>	<i>36</i>
4.1.6	<i>Preparação das amostras macrográficas.....</i>	<i>36</i>
4.2	Procedimento experimental.....	36
4.3	realização dos testes.....	37
4.3.1	<i>Teste 01 – 25% CO₂.....</i>	<i>37</i>
4.3.2	<i>Teste 02 – 20% CO₂.....</i>	<i>40</i>
4.3.3	<i>Teste 03 – 15% CO₂.....</i>	<i>43</i>
4.3.4	<i>Teste 04 – 10% CO₂.....</i>	<i>45</i>
5	RESULTADOS	48
5.1	macrografia.....	48
5.1.1	<i>CP 01 – Mistura com 25% CO₂.....</i>	<i>48</i>
5.1.2	<i>CP 02 – Mistura com 20% CO₂.....</i>	<i>49</i>
5.1.3	<i>CP 03 – Mistura com 15% CO₂.....</i>	<i>49</i>
5.1.4	<i>CP 04 – Mistura com 10% CO₂.....</i>	<i>50</i>
5.2	coleta de respingos	51
6	RESULTADOS	52
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é uma tecnologia conhecida há muito tempo. Cerca de 3600 anos antes de Cristo o ser humano já havia desenvolvido técnicas para unir materiais e assim aumentar a utilidade de seus produtos e ferramentas. A possibilidade de unir metal se transformou em um conhecimento importante para o desenvolvimento humano. A relevância desta tecnologia está até hoje presente no mundo.

A soldagem atualmente é reconhecida por ser a tecnologia chave para a engenharia mecânica, e tem como as áreas de maior aplicação as indústrias naval, ferroviária e automotiva. Para a fabricação de componentes de uma construção que solicitem um alto nível de segurança e que seja economicamente viável, muitas vezes, só é possível alcançar esta excelência se for utilizada a tecnologia de soldagem.

Boa parte desta grande aplicação deve-se ao processo de soldagem com eletrodo consumível sob proteção gasosa, chamado, em inglês, Gas Metal Arc Welding (GMAW) ou comumente conhecido como soldagem “Metal-Inert Gas” (MIG) e soldagem “Metal-Active Gas” (MAG). O processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem a arco mais aplicados devido as suas vantagens como a alta produtividade, a alta flexibilidade das posições de soldagem, excelente qualidade dos cordões e possibilidade de aplicação para soldagem de vários materiais com diferentes propriedades físicas.

Atualmente para atender às altas exigências de qualidade, produtividade, segurança do trabalho, redução nos custos de fabricação e à falta de soldadores qualificados e, por consequência, o aumento do custo da mão de obra em todos os países, os fabricantes de equipamentos de soldagem têm desenvolvido cada vez mais novas tecnologias de automação e melhoria nas fontes de soldagem.

Exemplos de fatores importantes para a reprodutibilidade do processo GMAW, são as fontes de soldagem e a possibilidade da alteração dos parâmetros do processo pelas fontes.

O desenvolvimento nas últimas três décadas das máquinas de soldagem, que passaram a ser eletrônicas, possibilitou influir nas características do processo através dos módulos eletrônicos e não mais pelos componentes de energia das fontes de soldagem convencionais, levando a uma manipulação e variação dos parâmetros quase sem limites.

Uma tendência no desenvolvimento dos processos de soldagem é a otimização dos processos conhecidos com as novas ferramentas: as fontes eletrônicas e os novos

métodos de análise. Um processo bem conhecido é o processo de transferência do metal pela corrente pulsada ou também conhecida pelo nome de arco pulsado.

O desenvolvimento da tecnologia a arco pulsado foi feito no início da década de 60 na Inglaterra, no Instituto de Soldagem (TWI- The Welding Institute), que tinha como objetivo soldar alumínio com gás de proteção argônio (FISCHER, 2011).

No modo de transferência pulsada, a corrente oscila entre dois níveis, um nível baixo, a corrente de base, e um nível alto, a corrente de pulso. Com a regulação adequada dos parâmetros é possível realizar a transferência do metal com uma gota por pulso sobre uma grande faixa de potência e com a possibilidade de controlar o tamanho das gotas, aporte térmico na peça e com pouca quantidade de respingos. A pulsação é feita pela interligação entre dois pontos de operação na fonte de soldagem e é conhecida como modulação de corrente. O ponto de operação é o ponto de intersecção entre a curva característica da fonte e a curva característica do arco.

No início da aplicação do processo arco pulsado, o grande número de parâmetros ajustáveis e a interação entre os mesmos complicou sua aplicação prática e apenas anos mais tarde, com a introdução da tecnologia de regulação sinérgica de fontes de soldagem, viabilizou-se a utilização prática da tecnologia arco pulsado.

A tecnologia de regulação sinérgica facilitou na escolha dos parâmetros adequados sobre uma relação gravada no equipamento entre os diferentes parâmetros de soldagem.

Estes parâmetros são programados e testados pelo fornecedor da máquina e o usuário final só tem possibilidade de modificar os parâmetros em uma faixa pequena que não influencia o processo de forma significativa. Ele é totalmente dependente do fornecedor e da tática de regulação.

A motivação deste trabalho é apresentar as propriedades e a capacidade do processo arco pulsado na área de soldagem e a influência da mistura do gás de proteção na soldagem deste processo, auxiliando, assim, na escolha do melhor custo benefício para cada aplicação e resultados esperados. No Brasil, a tecnologia de soldagem ao arco pulsado GMAW ainda é pouco aplicada na indústria, o que pode ser explicado pela falta de conhecimento dos operadores e a complexidade do processo.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- Apresentar a influência do teor de CO₂ da mistura do gás de proteção na quantidade de respingos gerados pelo processo GMAW arco pulsado;
- Apresentar a influência do teor de CO₂ da mistura do gás de proteção no perfil da solda pelo processo GMAW arco pulsado;
- Apresentar a influência do teor de CO₂ da mistura do gás de proteção na penetração da solda;
- Apresentar e definir qual o melhor teor de CO₂ da mistura do gás de proteção para a utilização do arco pulsado para a aplicação especificada neste trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO GMAW

A soldagem GMAW – Gas Metal Arc Welding, sigla adotada pela American Welding Society e que no Brasil é conhecida como processo MIG/MAG proveniente do inglês Metal Inert Gas e Metal Active Gas, é um processo de soldagem que é baseado na fonte de calor gerado por um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu e consumível, que é alimentado continuamente e o material a ser soldado (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Este processo pode ser utilizado na forma semi automática, quando operador conduz a tocha manualmente, ou automaticamente, quando a condução da tocha é feita por qualquer tipo de maquinário. Ambos são alimentados de forma mecânica por um equipamento chamado de alimentador, que mantém a velocidade de alimentação constante.

O arame ou também chamado de eletrodo nu, tem a função de inserir o metal de adição à junta a ser soldada passando por uma função de condutor elétrico fazendo o contato elétrico até o metal de base.

O gás de proteção tem como função evitar a contaminação das gotas de metal fundido em transferência e a poça de fusão pelos gases atmosféricos, sendo também o meio ionizante estabilizando o arco elétrico e controlando a transferência metálica, o consumo do arame e a fusão do metal de base.

O arco elétrico é a fonte de calor usada para fundir uma pequena parte do metal de base e do metal de adição (eletrodo consumível) (MATTHES e RICHTER, 2003).

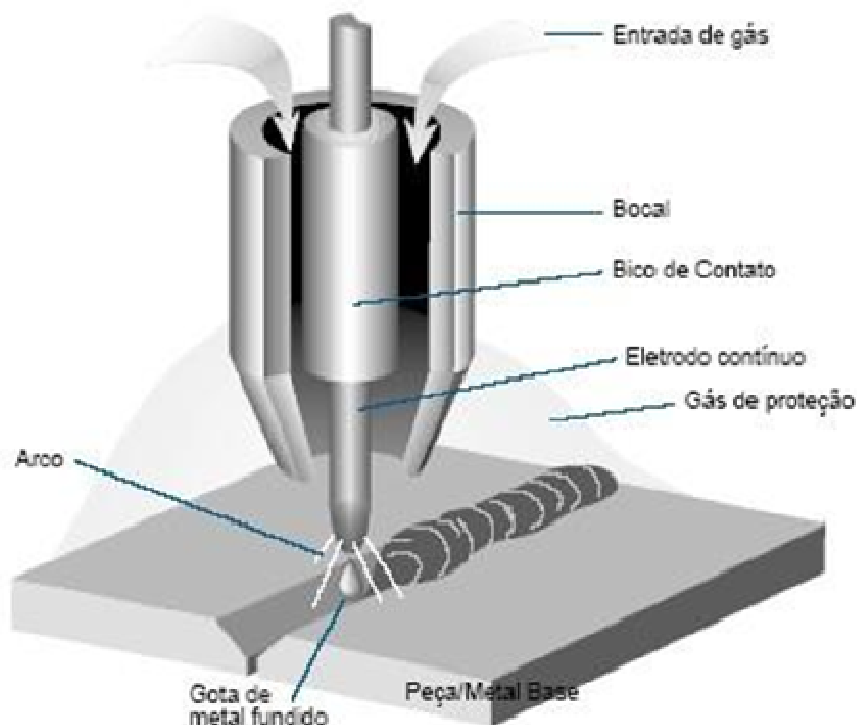


Figura 3.1 – Soldagem GMAW (EBAH, 2013)

O equipamento principal é composto por uma máquina de soldagem, um alimentador de arame com um reservatório de metal de adição, uma tocha de soldagem e cilindros de gás de proteção, conforme exemplo na figura abaixo.

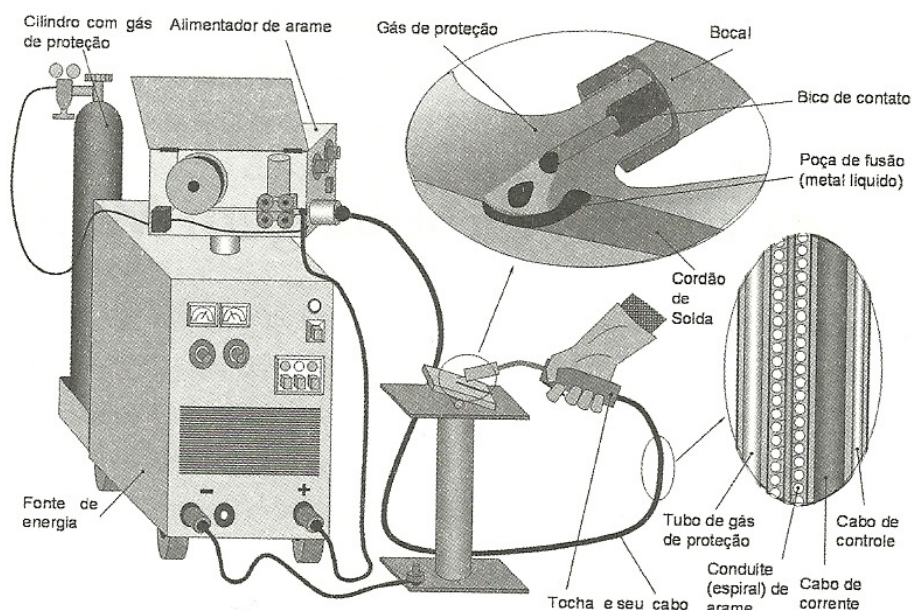


Figura 3.2 - Equipamento de Soldagem GMAW (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

O Stickout é a distância entre a extremidade do bico de contato e a extremidade do arame em contato com o arco (Figura 3). Mas é muito difícil de fazer a medição deste comprimento com o arco aberto, logo se toma o stickout como sendo a distância entre a extremidade do bico de contato e a superfície do material de base, que também é chamada de distância bico de contato-peça (DBCP) (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

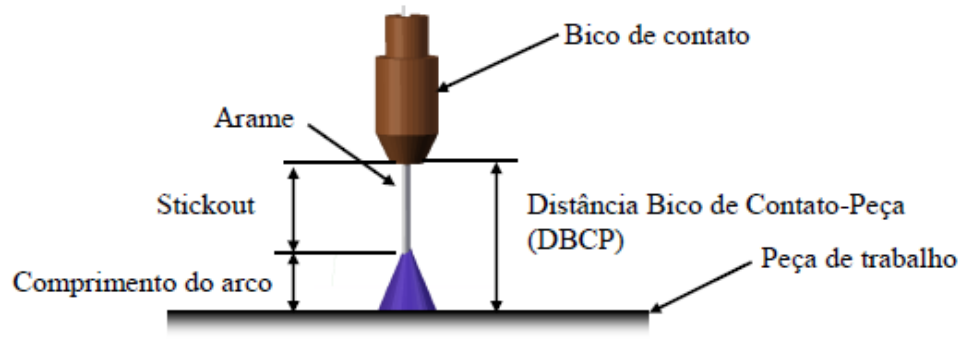


Figura 3.3 - Stickout (FISCHER, 2011)

As principais características do processo GMAW são a taxa elevada de fusão do arame e a variação de modos de transferência, resultando em alta produtividade, boa aparência do cordão de solda e, conseqüentemente, uma boa qualidade de soldagem. Porém existem restrições importantes devido à alta emissão de calor e luz, certa dificuldade no manuseio do equipamento e conhecimento na regulação dos parâmetros para que o processo se torne estável.

3.2 ARCO ELÉTRICO

Entre a ponta do arame de soldagem e o metal de base, existe uma região denominada plasmática, por onde passa uma grande quantidade de corrente, e que produz uma alta intensidade de calor e luz a qual se dá o nome de arco elétrico (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Um arco elétrico é uma forma de descarga de eletricidade entre dois eletrodos sustentados através de um gás ou vapor ionizado a alta temperatura. O eletrodo com pólo positivo se chama ânodo e o eletrodo com polo negativo se chama cátodo (GUILLE, 1984).

O tipo de corrente mais utilizada no processo de GMAW é a corrente contínua direta, com o eletrodo consumível conectado ao polo positivo (ânodo) da máquina e a peça a ser soldada ao polo negativo (cátodo). Nesta configuração, a área do cátodo é

bem maior do que do ânodo o que provoca uma forma cônica ou de sino no arco. O transporte da eletricidade dentro do gás ionizado só é possível se a quantidade das cargas elétricas (elétrons e íons) for suficiente. Por causa da maior mobilidade dos elétrons, estes são responsáveis pela maior parte do transporte da corrente. A emissão dos elétrons acontece no cátodo. Pela diferença de potencial, os elétrons são acelerados para o ânodo (SCHELLHASE, 1985). A relação entre tensão e corrente com um comprimento constante do arco é conhecida como característica estática. A curva característica no processo GMAW é uma função do comprimento do arco, composição do gás de proteção e material do arame.

Uma característica comum dos gases em condições normais é não serem condutores de eletricidade, porém em condições favoráveis como alta temperatura, baixa pressão e submetidos a um campo elétrico de alta intensidade, podem se ionizar. Através destas condições eles passam para a forma de plasma, que por sua vez são condutores de eletricidade (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Este arco elétrico aplicado em soldagem é aceito universalmente que seja composto no sentido longitudinal por três regiões, coluna de plasma, região anódica e catódica. Como uma corrente passa por essa região, haverá queda de tensão em cada uma delas, sendo que na coluna de plasma a queda não excede alguns poucos volts e o restante da tensão consumida se dá nas regiões anódica e catódica. Assumindo a situação mais comum utilizada no processo GMAW, onde o arame (eletrodo) está conectado ao polo positivo e a peça ao polo negativo, experimentalmente tem-se que a queda na região catódica é maior que na região anódica, em torno de 5 a 20 V e 2 a 8 V respectivamente (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

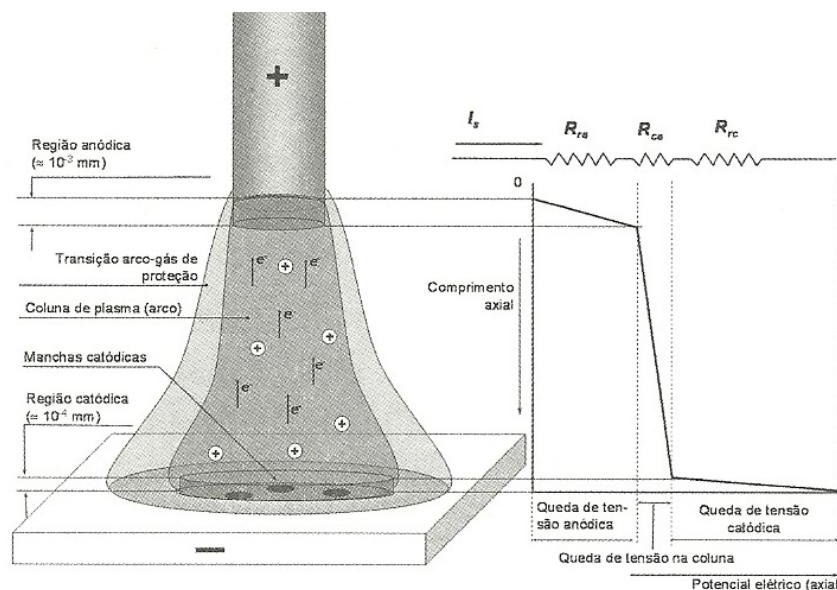


Figura 3.4 - Representação esquemática do arco elétrico (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

A passagem de corrente por estas regiões é acompanhada por reações eletrônicas e químicas muito complexas, que geram uma grande quantidade de luz e calor. Quanto maior o valor da corrente, maiores serão as quedas de tensão nas regiões catódica e anódica e, como consequência, maior será o calor gerado. Isto é utilizado pela soldagem para controlar a transferência metálica, fundindo os metais de base e o de adição.

3.3 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO GMAW

No processo GMAW, por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, a transferência do metal de solda para a poça de fusão é realizada por gotas de metal fundido através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracteriza um determinado tipo de transferência metálica.

Dentre os fatores que influenciam a transferência metálica destacam-se o material e diâmetro do eletrodo, o gás de proteção, a polaridade e intensidade da corrente de soldagem, o comprimento do arco e a pressão do ambiente.

A transferência natural acontece por dois mecanismos. O primeiro deles caracteriza-se pelo contato da gota com a poça de fusão antes do destacamento, essa classe é denominada como transferência por curto circuito. O segundo é caracterizado pelo destacamento da gota antes do contato com a poça, essa classe é denominada transferência por voo livre, o qual se subdivide em seis modos diferentes, de acordo com a formação e destacamento das gotas.

Tabela 2.1 – Classes e respectivos modos naturais de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG


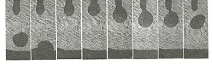

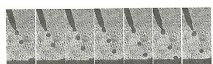
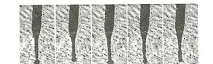


Classe de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por curto-circuito	Por curto-circuito		Tensão superficial
Por vôo livre	Globular		Gravitacional
	Globular Repulsiva		Gravitacional e reação
	Goticular (ou Goticular projetada)		Eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Reações químicas

Figura 3.5 - Modos naturais de transferência em GMAW (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

3.3.1 Transferência metálica por curto circuito

Neste modo uma gota de metal líquido em crescimento se forma na ponta do eletrodo e atinge periodicamente a poça de fusão, gerando um curto circuito e a extinção momentânea do arco. Caracterizada pela baixa corrente e baixa tensão, é uma transferência muito utilizada em chapas finas, soldas fora de posição ou na soldagem de passe raiz em juntas tubulares, usualmente limitadas para arames de até 1,2 mm de diâmetro.



Figura 3.6 - Modo de transferência *Curto Circuito* (ABS, 2013)

Devido aos baixos valores de corrente e tensão durante a fase de arco aberto e ao fato de que durante parte do processo o arco se apaga, o calor transferido para peça é reduzido, o que permite uma boa utilização em chapas de espessuras baixas e em soldagem fora da posição plana. Devido a isso não é recomendável a soldagem neste modo de transferência em espessuras mais grossas, pois pode ocorrer falta de fusão e mordeduras.

3.3.2 Transferência metálica goticular

A transferência goticular projetada ou mais conhecida como “Spray”, caracteriza-se pela transferência de pequenas gotas uniformes (geralmente menores que o diâmetro do eletrodo) de forma sequencial, através da coluna do arco em alta velocidade e com baixo volume de respingos.

Estas gotas são transferidas e depositadas com alta energia (alta corrente e alta tensão conforme o diâmetro do arame) para garantir um arco longo o suficiente, sendo a atmosfera protetora à base de argônio, fazendo com que a poça de fusão seja bastante fluída e o processo somente possa ser utilizado na posição plana e horizontal, geralmente em metal de base de espessuras superiores a 3 mm ou em enchimento de juntas.

A condição indispensável para que este modo ocorra é que a corrente de soldagem deverá ultrapassar a corrente de transição. Até que esta faixa seja alcançada, o tamanho das gotas se reduz lentamente com o aumento também lento da frequência de transferência das gotas, sendo maior que 200 gotas por segundo.



Figura 3.7 - Modo de transferência *Goticular Projetada* (ABS, 2013)

3.3.3 Transferência metálica globular

Este tipo de transferência ocorre quando se utilizam tensões de arco moderadas, localizadas entre a de Curto Circuito e a de Goticular Projetada (opera com Tensão e Corrente de Arco intermediária as mesmas) e se caracteriza pela transferência irregular de gotas grandes com dimensões maiores que o diâmetro do arame, frequência baixa (entre 1 e 10 gotas por segundo) e elevado nível de respingos devido à transferência das mesmas através da coluna do arco ocasionar curtos circuitos eventuais e o arco não ser considerado estável. Pelo fato da força gravitacional ser dominante neste tipo de transferência, a soldagem fica limitada a posição plana, pois em outras posições a gota pode não acompanhar o arco.

Este é o tipo de transferência que pode ser muito “problemática” no que se refere à qualidade da solda, pois dependendo da regulagem dos parâmetros de tensão e corrente e do tipo de gás de proteção utilizado, poderá não ter uma energia de arco e de gota suficientemente altos, o que ocasionaria dificuldades para fundir os metais de base, causando falta de fusão dos materiais e impactando no resultado final esperado.



Figura 3.8 - Modo de transferência *Globular* (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

3.3.4 Transferência metálica por arco controlado pulsado

O modo de transferência pulsado apareceu com o intuito de reunir as melhores características do modo de transferência por curto circuito e o goticular em um único processo, ou seja, uma transferência regular e estável que proporcione pouco ou nenhum respingo.

Caracteriza-se pela oscilação entre uma corrente baixa, chamada corrente de base, e uma corrente alta, chamada corrente de pico ou corrente de pulso. Depois da ignição, o arco fica sempre aberto, sem formação de curtos-circuitos.

A corrente de base tem como objetivo manter o arco aberto com baixa energia e pré-aquecer o material de base e o eletrodo. A corrente de pulso ou de pico, maior do que a corrente de transição, tem como objetivo formar a gota na ponta do eletrodo e em seguida atuar no seu destacamento. Durante a fase do pulso uma ou mais gotas podem se formar, porém tem sido universalmente aceita a condição de uma gota por pulso.

Existem poucas limitações para este tipo de transferência sendo possível soldar em todas as posições e espessuras, mas é sempre importante ajustar as condições e parâmetros de soldagem para cada aplicação. Uma das desvantagens deste processo é o grande número de parâmetros e a dificuldade em defini-los, fato que é compensado em grande parte pelos controles sinérgicos. Outra desvantagem é a emissão de som, que se assemelha a um “zumbido de abelha”, podendo ser um fator de incômodo ao soldador após algum tempo de soldagem.

3.4 SOLDAGEM MIG PULSADO SINÉRGICO

As principais formas de transferência metálica na soldagem GMAW são: curto-circuito, goticular projetada (spray) e transferência pulsada. Para todos estes modos é necessário ajustar os parâmetros mais relevantes como, por exemplo, velocidade da alimentação do arame e a tensão.

Para atingir a condição adequada de soldagem é importante que sejam regulados de forma adequada os parâmetros de pulso e a velocidade de alimentação. Logo, a grande dificuldade de se utilizar este processo está na regulação correta dos parâmetros.

Por isto a partir da década de 80, fazem parte dos equipamentos o Controle Sinérgico. No contexto de soldagem MIG, sinérgica significa trabalhar junto, ou seja, os parâmetros de pulso trabalhar conjuntamente com a velocidade de alimentação do arame, podendo ser definido como sistema pelo qual um ou mais parâmetros de pulsos significativos são automaticamente modificados em função da variação de um parâmetro operacional (velocidade de alimentação ou corrente média), de tal forma que a estabilidade da transferência de gotas é mantida ao longo de uma faixa de velocidade de alimentação ou nível médio de corrente (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

O controle sinérgico funciona através de um banco de dados existente no equipamento e rotinas computacionais que são capazes de “informar” ao equipamento qual a melhor combinação dos parâmetros de pulso para um determinado gás e arame-eletrodo, independente da velocidade de alimentação ou corrente selecionada (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

Tanto o banco de dados, como as rotinas, são verdadeiras “caixas pretas” de cada fabricante. Geralmente os equipamentos têm em sua memória programas para

cada tipo de material de base, gás de proteção e bitolas de arame, onde após a seleção do programa adequado para cada aplicação, é necessário regular a velocidade de alimentação, onde o sistema lê o valor de alimentação desejado procurando no banco de dados as informações relativas ao gás, metal de base e arame eletrodo, processa estas informações na rotina computacional e regula os parâmetros de pulso. Alguns fabricantes preferem ter a corrente média como parâmetro de regulagem ao invés da velocidade de alimentação.

Esta tecnologia da fonte sinérgica simplificou muito a seleção dos parâmetros do processo com arco pulsado e melhorou a possibilidade de aplicação em sistemas automatizados e semiautomatizados.

3.4.1 Fontes de soldagem com arco pulsado

As fontes de soldagem transformam a energia elétrica da rede em uma forma apropriada para a soldagem. Diversas exigências para a qualidade da solda devem ser atendidas pelas propriedades das máquinas de soldagem como a facilidade da ignição do arco elétrico, facilidade de ajuste dos parâmetros de soldagem, segurança de trabalho, tempo mínimo de manutenção e alto ciclo de trabalho.

Para a soldagem a arco elétrico, a corrente e tensão necessárias podem ser obtidas com diversos tipos de máquinas. Podem-se separar as fontes em duas classes: máquinas convencionais e máquinas eletrônicas. Atualmente, para soldagem com arco pulsado, as máquinas eletrônicas (Fontes transistorizadas) são as mais aplicadas e, por causa disto, as explicações seguintes se concentram somente nas fontes transistorizadas (PUSCHNER, 1986).

As máquinas de soldagem eletrônicas usam módulos eletrônicos para "criar" os parâmetros de soldagem. As características da fonte da energia são definidas pelo controlador dos módulos e não pelos componentes de energia. Nas máquinas eletrônicas, a regulagem previamente ajustada realiza a variação dos parâmetros e, conseqüentemente, os processos térmicos no arco e, em especial, a transferência metálica. Esta tecnologia possibilita a aplicação das fontes nos diversos processos de soldagem a arco elétrico e, por causa disto, estas fontes também são chamadas de fontes multiprocessos. As máquinas transistorizadas podem se dividir em diferentes tipos, como mostrado na figura abaixo.

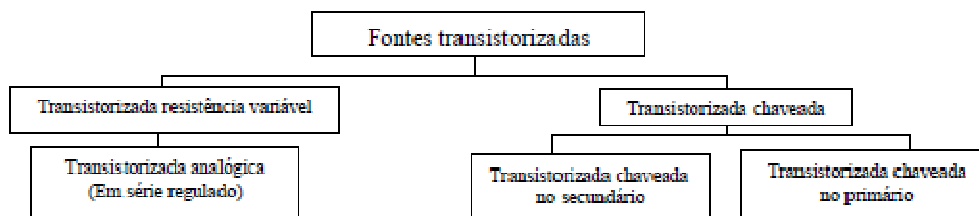


Figura 3.9 - Classificação das fontes transistorizadas (PUSCHNER, 1986)

Fontes transistorizadas analógicas têm um transformador-retificador com um banco de transistores regulado em série. Depois do transformador, a tensão é retificada imediatamente e um condensador alimenta os transistores com uma tensão constante. Portanto, os transistores reagem muito rápido no sinal do regulador. Os transistores são como uma resistência variável com possibilidade de trocar os valores rapidamente. No banco dos transistores, a parte da energia que não é usada para alimentação do arco, transforma em energia térmica. Esta energia precisa ser retirada com uma refrigeração adicional, comumente líquida. As desvantagens destas fontes são a baixa eficiência de geração de energia e o tamanho, além de não terem muita aplicação na indústria.

Para a separação galvânica entre circuito da rede e circuito de soldagem é necessário um transformador. A energia para a alimentação do arco pode ser regulada nos dois lados, antes do transformador ou depois do transformador. Se este regulador não trabalha continuamente como nas fontes transistorizadas analógicas, porém com uma frequência de ligar e desligar, as fontes chamam transistorizadas chaveadas. Se o módulo chaveado de regulação está antes do transformador as fontes se chamam transistorizadas chaveadas no primário e depois do transformador, transistorizadas chaveada no secundário.

A maioria dos novos desenvolvimentos de fonte de soldagem para o processo de GMAW é no estilo de fontes transistorizadas chaveadas no primário. Atualmente, nas aplicações de soldagem com arco pulsado, as fontes transistorizadas chaveadas no primário, também chamadas fontes inversoras, estão mais estabelecidas do que as chaveadas no secundário por causa do peso e tamanho, resultando em melhor mobilidade.

Durante a soldagem, os componentes internos das fontes aquecem pela passagem da corrente elétrica. Para não destruir os componentes a temperatura máxima está limitada. Um indicador para o usuário da máquina, neste contexto, é o ciclo de trabalho ou fator de trabalho. O ciclo de trabalho é definido com a relação entre o tempo de operação permitido durante um intervalo de teste especificado.

Ele é um valor que indica a capacidade da máquina ou da tocha de soldagem e é indicado por dois números: um de corrente e um de porcentagem, por exemplo, 400A e 60%. O valor da corrente significa o valor máximo possível de usar com aquele ciclo de trabalho. A porcentagem significa em quanto tempo é possível usar a corrente máxima em 10 minutos. No exemplo, 400A e 60%, significa que com 400A é possível soldar 6 minutos em 10 minutos, o resto do tempo, 4 minutos, é necessário para resfriar os componentes.

Para soldagem com arco pulsado, é vantajoso que o fator de trabalho da máquina esteja na faixa de 400A e 500A (ou maior) com um mínimo de 60%, por causa da corrente alta de pulso usada no processo (ABS, 2013).

3.4.2 Alimentador do arame e tocha de soldagem

O alimentador do arame precisa mover o arame continuamente ao longo de uma distância, independente do comprimento entre 1,2m a 5m, com uma velocidade constante. Interferências da alimentação provocam mudanças no processo de soldagem causando irregularidades e até erros na soldagem. Para uma alimentação constante é vantajoso usar dois pares de roletes sendo, 2 roletes de alimentação e 2 roletes de pressão. Para arames finos com resistência baixa, como alumínio, ou para alimentação em distâncias maiores que 6m é melhor usar sistemas com mais do que um alimentador.

A tocha de soldagem e os cabos possuem três funções básicas: conduzir a corrente de soldagem da fonte até bico de contato, conduzir gás de proteção até a região do arco e guiar o arame até o bico de contato. Ela consiste principalmente em cabo de corrente, mangueira de gás de proteção no modelo refrigerado à água, mangueiras de refrigeração, guia espiral para o arame, punho, tubo da tocha, porta bico, difusor de gás, bico de contato e bocal de gás (ABS, 2013).

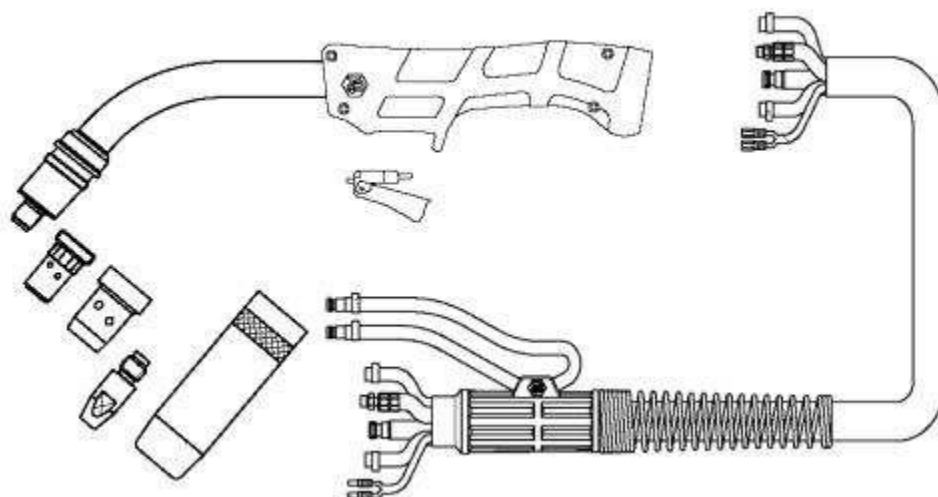


Figura 3.10 - Tocha refrigerada a água (ABS, 2013)

O bico de contato é uma parte importante na tocha e tem a função de guiar o arame eletrodo e conduzir a corrente para o eletrodo. Ele precisa aguentar uma carga alta de forças mecânicas e temperaturas altas. Durante a soldagem, há um ponto de contato entre bico e arame. Este ponto muda de posição por causa de desgaste. A variação do ponto de transmissão da corrente provoca diferentes distâncias do bico de contato e peça (DBCP) e pode causar instabilidade do processo (ABS, 2013).

Durante o processo de soldagem, os componentes da tocha aquecem por causa da energia do processo. Para aguentar esta carga térmica, a tocha precisa ser refrigerada. A refrigeração pode ocorrer com o próprio gás de proteção ou com água. Assim como as máquinas de soldagem, as tochas também têm um fator de trabalho e este valor não pode ser ultrapassado. Por exemplo, tochas refrigeradas a ar ou a gás não aguentam um valor maior do que 80% (8 minutos soldagem, 2 minutos refrigeração) e o valor da corrente é menor do que das tochas refrigeradas à água.

No processo de soldagem com arco pulsado ocorrem correntes altas, dependendo do material, de até 500A ou maiores. Neste caso, a refrigeração é muito importante. O ciclo de trabalho necessário para a tocha precisa ser na faixa de 300A - 500A e dependendo da aplicação, até 100%. Por causa disto, o uso de uma tocha refrigerada a água é vantajosa para o processo de soldagem com arco pulsado.

3.4.3 Seleção de parâmetros para o processo de soldagem GMAW pulsado

É impossível que os equipamentos, mesmo sinérgicos, cubram todas as combinações possíveis. Com isso, mesmo com o sinergismo atuando, algumas vezes é necessário redefinir os parâmetros memorizados nos equipamentos comerciais. Para tal, se faz necessário uma metodologia para servir como guia prático para a seleção de parâmetros em qualquer equipamento de soldagem que trabalhe no modo corrente constante (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

a) Verificar se o processo pulsado é a melhor opção para o caso, considerando suas vantagens, o bom acabamento do cordão, um baixo nível de respingos, a soldagem fora de posição, uma maior taxa de deposição para o mesmo valor de corrente média e suas limitações, maior custo, dificuldade de ajuste dos parâmetros, taxa de deposição menor que em goticular;

b) Definir a corrente média (I_m), com relação à entrada de calor requerida para a espessura do material, tipo de junta e posição de soldagem, lembrando sempre que a mesma deve situar-se principalmente abaixo da corrente de transição globular-goticular;

c) Definir o diâmetro do eletrodo, o qual é função principalmente da corrente a ser usada e as características do alimentador;

d) Definir a distância do bico de contato/peça (DBCP), considerando que valores maiores aumentam a taxa de deposição para uma dada corrente, mas podem prejudicar a penetração e o acabamento do cordão. Normalmente se utiliza como padrão um valor de 15 mm para um comprimento de arco aproximado de 5 mm .

e) Escolher a corrente de pulso (I_p), e um tempo de pulso (t_p) a partir de dados experimentais confiáveis;

f) Determinar a corrente de base (I_b), sempre com valores acima de 35 a 40 A, para manter o arco estável. Lembrar que valores maiores reduzem a taxa de deposição e podem ser utilizados para se trabalhar com este efeito na junta;

g) Determinar o tempo base (t_b), utilizando a equação abaixo, assumindo que o formato de onda é perfeitamente retangular;

$$t_b = \frac{I_p t_p - I_m t_p}{I_m - I_b} \quad (\text{ms})$$

h) Calcular a frequência de pulsos que deve ficar acima de 30 Hz;

$$f_p = \frac{1000}{t_p + t_b} \quad (\text{Hz})$$

i) Regular a velocidade de alimentação do eletrodo de tal forma a se alcançar um arco desejado, geralmente o mais curto possível, mas sem provocar curtos circuitos, aproximadamente 5 mm .

Para os equipamentos que trabalham no modo misto não é permitido o ajuste de corrente de pulso. Logo, a metodologia acima pode ser utilizada substituindo-se o item “e)” pelo descrito a seguir;

- Escolher uma tensão de pulso (U_p) e um tempo de pulso (t_p) a partir de dados confiáveis. Como a tensão de pulso é muito dependente do comprimento de arco, tipo de gás, etc., não é possível criar tabelas. A solução é escolher um par I_p t_p e ajustar U_p até que se consiga o valor de I_p .

3.5 GÁS DE PROTEÇÃO

O processo de soldagem GMAW requer um fluxo de gás em torno do conjunto metal de base/ arame-eletrodo. Entre outras, a função primária do gás de proteção é proteger o material fundido do arame, a poça de fusão e o arco elétrico, contra elementos da atmosfera, como, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, os quais provocam efeitos nocivos, como formação de poros, defeitos de fusão, excesso de óxidos, inclusões e trincas. Também exerce funções adicionais, como estabilizar o arco, controlar a operacionalidade e a transferência metálica, influi na geometria, propriedades mecânicas e características metalúrgicas da solda.

Para escolher os gases de proteção para o processo de soldagem, é importante conhecer as suas propriedades físicas tais como densidade, potencial de ionização ou dissociação e condutividade térmica e elétrica.

3.5.1 Características, propriedades e misturas para a soldagem

A eficiência da proteção depende da capacidade do sistema em excluir gases do meio ambiente. Para isso não somente o tipo de gás de proteção é importante, mas também a configuração do bocal da tocha e a vazão do gás. Independente do tipo de gás utilizado deve-se minimizar a incidência de corrente de ar durante a soldagem, devido ao comprometimento da proteção da poça de fusão. Um fluxo adequado deve estar entre 10 a 16 l/min, valores acima disto são normalmente ineficientes e antieconômicos.

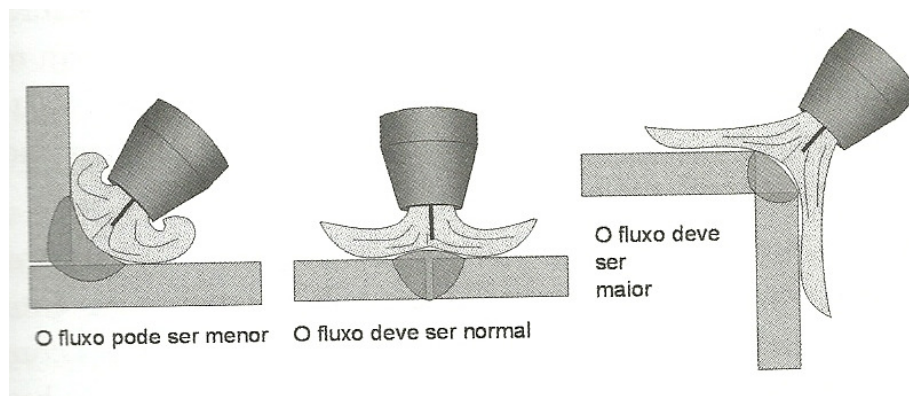


Figura 3.11 - Fluxo do gás de proteção (SCOTTI e PONOMAREV, 2008)

A densidade do gás de proteção tem influência na taxa da vazão de gás de proteção, afetando a posição de soldagem. Gases de alta densidade precisam uma maior vazão de gás de proteção na posição de soldagem sobre cabeça para garantir uma proteção do arco e da poça de fusão eficiente.

A ignição e a estabilidade do arco são fortemente influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção, que é a diferença de potencial necessária para remover um elétron de um átomo de gás, tornando este um íon. Gases com baixo potencial de ionização têm seus átomos mais facilmente transformados em íons.

A energia de dissociação é a energia qual está liberada na recombinação. Quando gases moleculares são ionizados eles têm íons livre. Estes íons podem voltar a recombinar-se para dar origem ao composto original e liberar energia adicional sob a forma de calor (ABS, 2013).

As condutividades térmica e elétrica do gás de proteção são propriedades físicas importantes.

Elas influenciam significativamente na transferência metálica, as características geométricas e a microestrutura do perfil de penetração na soldagem GMAW (PUSCHNER, 1986). A condutividade térmica está relacionada com a capacidade de transferência do calor gerado pelo arco para o metal de base. Ela varia em função da temperatura. Gases de alta condutividade térmica transferem mais calor para o metal de base, mas podem aumentar a resistência do arco e, portanto, provocar um aumento na tensão do arco.

Os gases utilizados no processo MIG/MAG podem ser inertes, ativos ou misturas de gases inertes com gases ativos. Normalmente são usadas misturas de dois ou três gases (argônio, hélio, dióxido de carbono ou oxigênio) com uma grande porcentagem de argônio (SCOTTI e PONOMAREV, 2008).

A aplicação de soldagem define o gás de proteção necessário. Os gases inertes, que não reagem com metal de adição e de base são usados para metais não ferrosos, por exemplo, para soldagem de alumínio e magnésio. Gases ativos, os quais reagem com metal de adição e de base, são usados, por exemplo, na soldagem e brasagem de aço comum e aço inoxidável.

Gases inertes utilizados no processo MIG são o argônio e o hélio ou misturas deles. Por causa das propriedades físicas e da disponibilidade e custo no mercado, o argônio é o gás de proteção inerte mais utilizado.

O argônio (Ar) é um gás não tóxico. Pela facilidade de liberar elétrons, representado por seu baixo potencial de ionização (15,8 V/Molécula), o argônio possibilita um arco muito estável em baixas correntes e permite uma ignição do arco fácil. Ele possibilita a transferência por spray em correntes mais baixas e forma um cordão com penetração estreita no centro, conhecida como penetração em dedo (finger). O baixo potencial de ionização e baixa condutividade térmica provocam também desvantagens como baixa energia no arco e, portanto, menor penetração e aparecimento de mordeduras. Argônio puro é desvantajoso na soldagem de aços. Misturas à base de argônio com gases ativos, como dióxido de carbono ou oxigênio são mais aplicadas.

Dióxido de carbono (CO_2) e misturas com ele são muitos usados no processo de soldagem MAG. O menor custo em relação aos gases inertes e a característica de boas condições de penetração estimulam o seu uso, mas usar CO_2 puro pode provocar maiores custos depois de soldagem, provocados pela necessidade de limpeza de respingos mais intensos e da instabilidade do arco (SCHELLHASE, 1985). Dióxido de carbono é um gás oxidante acima de 600°C , embora seja relativamente inerte na

temperatura ambiente. Assim é um gás ativo nas temperaturas de soldagem, o que faz com que, durante a soldagem, ocorra maior oxidação dos elementos de liga. Nas altas temperaturas do arco, o dióxido de carbono dissocia endotermicamente em monóxido de carbono (CO) e oxigênio livre (O) e recombina na poça de fusão exotermicamente. O oxigênio forma óxidos que são liberados da poça de fusão, na forma de escória ou carepa e de inclusões. A quantidade e a composição da escória são dependentes da combinação gás de proteção e arame. Nas combinações comuns, a composição da escoria é de óxido de manganês e silício com característica de vidro, que se localiza sobre a superfície do cordão e que deve ser removida antes de outros processos, como a pintura da peça (ABS, 2013).

A baixa condutividade elétrica do CO_2 provoca um arco instável e um modo de transferência do metal para a poça de fusão mais violento com uma alta quantidade de respingos.

Com o acréscimo da quantidade de CO_2 na mistura do gás de proteção, a corrente de transição aumenta e dificulta a transferência do metal. A condutividade elétrica do dióxido de carbono aumenta com a temperatura e uma coluna com alta condutividade elétrica está formada no centro do arco, a qual transporta uma grande quantidade de corrente. Com o aumento da quantidade do CO_2 a concentração de elétrons na ponta do eletrodo aumenta e se forma um arco pontual, com uma maneira diferente do que com argônio. Altas quantidades de CO_2 atuam contra a transferência do metal.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizados neste trabalho. Os testes foram realizados no Laboratório de Soldagem de uma empresa do ramo de equipamentos agrícolas. Todos os testes foram realizados em aço carbono.

4.1 MATERIAIS USADOS

4.1.1 Metal de base

O material de base utilizado foi o aço NBR 6648 CG21. Utilizado em componentes estruturais que necessitam ter desempenho mecânico e boas características de soldabilidade.

A figura abaixo descreve a composição química e suas propriedades mecânicas.

ESPECIFICAÇÃO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						PROPRIEDADES MECÂNICAS				
NORMA	GRAU	C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cu (mín.)	LE* (MPa)	LR** (Mpa)	ALONGAMENTO		
										Espessura (mm)	Base de Medida(mm)	Valor min. (%)
NBR 6648	CG 21	0,2	1	-	0,04	0,05	-	205	340	Qualquer	200	23

*LE - Limite de Escoamento

**LR - Limite de resistência

Figura 4.1 - Composição Química e Prpriedades Mecânicas do Aço Carbono NBR 6648 – CG21

4.1.2 Metal de adição

Para a realização dos testes foi utilizado o material de adição ER70S-6 da norma americana AWS A5.18. A composição química e as propriedades mecânicas típicas deste arame são mostradas na figura abaixo.

CLASSE	TIPO	ELEMENTOS	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
AWS A 5.18	ER70S-6	% MÍN	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
		% MÁX	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5*	0,15	0,15	0,15	0,03

* O limite máximo de cobre inclui o residual existente no aço, mais o revestimento

Figura 4.2 - Composição Química do arame ER70S-6

CLASSE	TIPO	PROPRIEDADES	LIMITE DE ESCOAMENTO	LIMITE DE RESISTÊNCIA	ALONGAMENTO
AWS A 5.18	ER70S-6	% MÍN	480 MPa	560 Mpa	22%

Figura 4.3 – Propriedades Mecânicas do arame ER70S-6

Este é um arame não cobreado. Foram usadas bobinas com um peso de 18 kg de metal de adição. Antes dos testes de soldagem, os diâmetros foram verificados com um micrômetro.

Este arame pode ser usado para todos os modos de transferência de metal e posição de soldagem.



Figura 4.4 – Arame ER70S-6

4.1.3 Gás de proteção

Para o estudo foram utilizadas misturas de gás de proteção de 25%, 20%, 15% e 10% de dióxido de carbono e o restante de argônio.

Como apresentado no item 3.5.1, o aumento da quantidade de CO₂ dificulta a transferência do metal por causa da concentração de corrente no arco e no eletrodo. O arco está localizado no ponto de eletrodo e dificulta a ação do efeito "Pinch". Uma quantidade de 25% CO₂ no gás de proteção não possibilita uma transferência uniforme no modo de arco pulsado e mais respingos são produzidos. A grande vantagem da tecnologia arco pulsado é a transferência do metal sem formação de respingos.

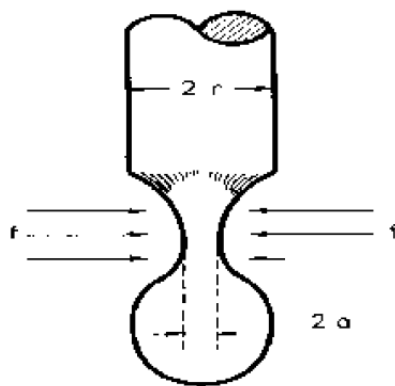


Figura 4.5 – Efeito Pinch

4.1.4 Equipamento e técnicas de análise

Todos os testes foram realizados com os seguintes equipamentos;

- Máquina de Soldagem com alimentador de arame POWER WAVE 355.



Figura 4.6 – Fonte de Soldagem



Figura 4.7 – Alimentador de arame

- Tocha Seca MB 500 BINZEL.



Figura 4.8 – Tocha seca marca Binzel

- Paquímetro.

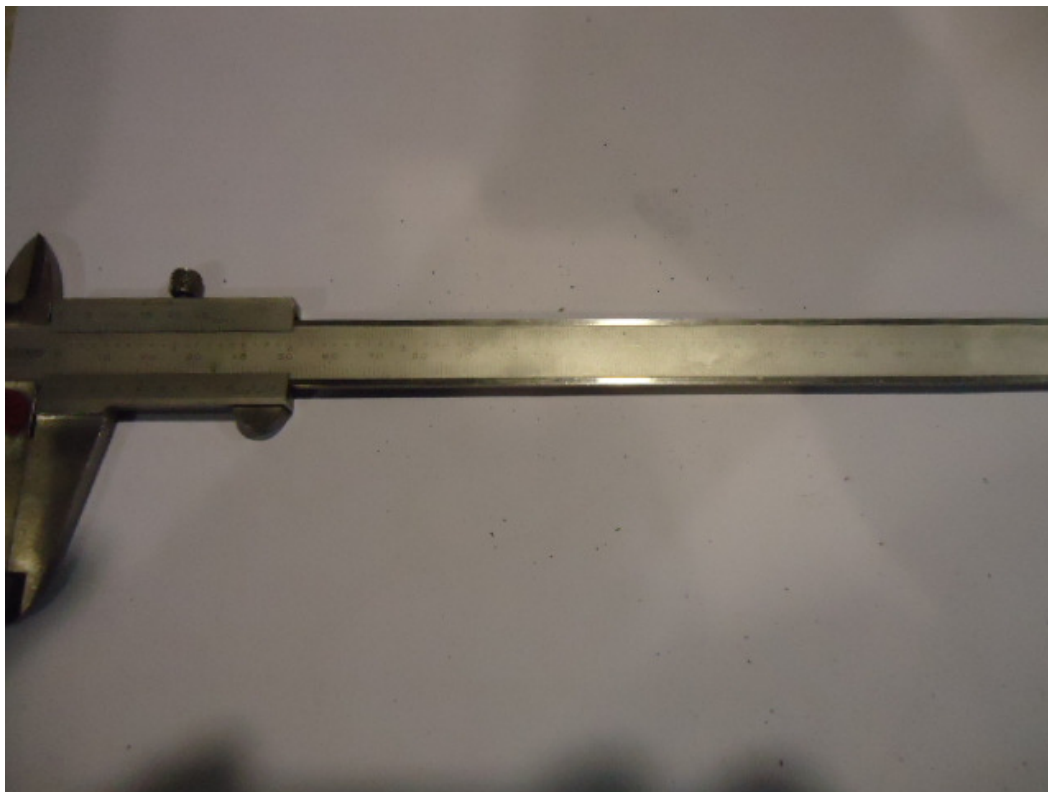


Figura 4.9 – Paquímetro

- Balança de precisão centesimal da marca TOLEDO.

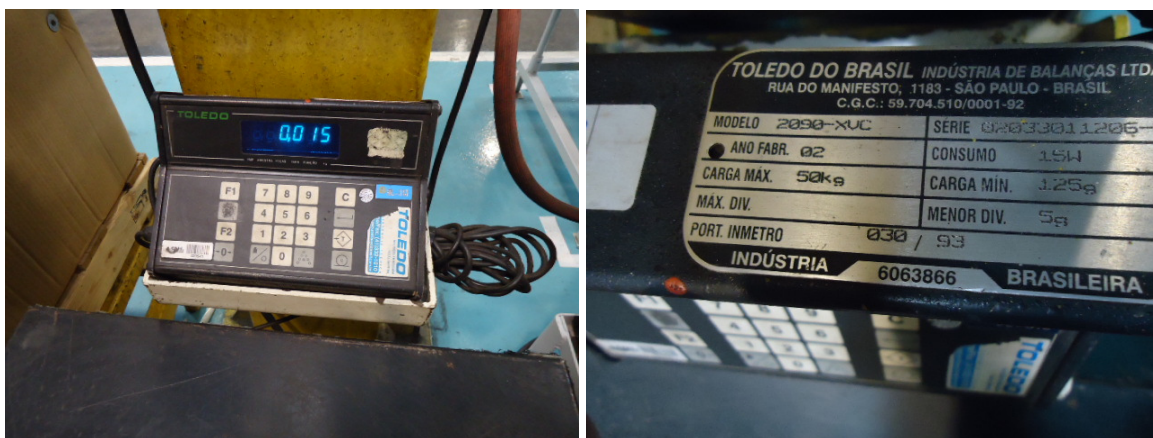


Figura 4.10 – Balança de precisão

Para a execução das amostras, foram pesadas as chapas teste antes e depois de cada soldagem, assim como o carretel do material de adição.

4.1.5 Chapas teste

As chapas testes foram confeccionadas em tamanho e espessura padrão, conforme o requerido pela norma AWS D1.1.

Para a realização das chapas testes, foi mantido o maior número possível de variáveis, tendo em vista que o objetivo deste estudo é verificar o comportamento da geração de respingos com diferentes níveis de dióxido de carbono na mistura do gás de proteção.

4.1.6 Preparação das amostras macrográficas

A avaliação da geometria do cordão de solda foi realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. A análise foi feita com o seguinte procedimento. Primeiro, foi feita a avaliação visual da superfície da solda. Depois, o corpo de prova com o cordão de solda foi cortado transversalmente no meio para realização de ensaio macrográfico. O corte foi feito com discos de corte abrasivo, sob-refrigeração. O corpo de prova foi preparado com o procedimento de embutimento a frio para o lixamento.

O lixamento foi feito com lixas de diferentes granulometrias na sequência de 120, 220 e 320 e posteriormente no processo de polimento. Depois da limpeza e secagem, a amostra foi atacada quimicamente com Nital 3%. Em seguida foram medidas as características geométricas na face transversal do cordão de solda.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram feitos com o seguinte procedimento.

- Pesar a chapa teste antes e depois da soldagem;
- Pesar o carretel do arame consumível antes e depois da soldagem;

- Preparar o corpo de prova, limpando a superfície, garantindo que a mesma fique isenta de sujeira, óleo ou graxa, fixar o corpo de prova na mesa de deslocamento;
- Escolher o programa pré-instalado pelo fornecedor do equipamento, e inserir os parâmetros na fonte de soldagem;
- Executar da solda;
- Avaliar visualmente a solda;
- Documentar os resultados no protocolo de ensaio;
- Trocar corpo de prova;
- Repetição do teste com mesmos parâmetros alterando a mistura do gás;
- Preparar análise macrográfica.

4.3 REALIZAÇÃO DOS TESTES

Os testes foram realizados na seguinte Ordem;

- Teste 01 – Mistura com 25% CO₂ e 75% Ar;
- Teste 02 – Mistura com 20% CO₂ e 80% Ar;
- Teste 03 – Mistura com 15% CO₂ e 85% Ar;
- Teste 04 – Mistura com 10% CO₂ e 90% Ar;

Os parâmetros de soldagem utilizados foram;

- Tensão – Entre 25 e 26 V.
- Corrente – Entre 250 e 260 A.
- Velocidade de Soldagem – Entre 40 e 50 cm/min.
- Velocidade de Alimentação – 7,79 m/min.
- Vazão do gás de proteção – 16L/min

4.3.1 Teste 01 – 25% CO₂

Para a soldagem da chapa teste 01 com gás de proteção de composição 25% CO₂ – 75% Ar, os dados coletados foram;

- Peso do arame antes da soldagem - 18,245 Kg.

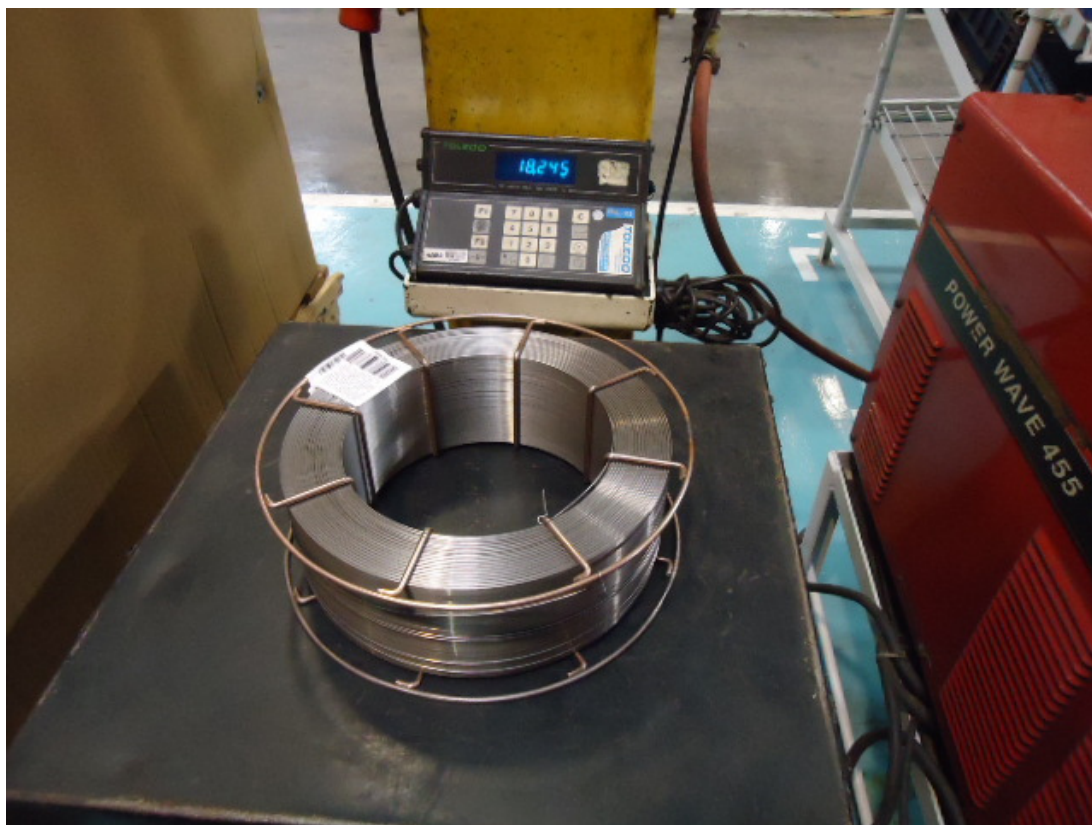


Figura 4.11 – Arame antes da soldagem com mistura 25% CO₂

- Peso da chapa antes da soldagem - 12,815 Kg.



Figura 4.12 – Chapa antes da soldagem com mistura 25% CO₂

- Corrente de soldagem – 256 A.
- Tensão de soldagem – 25,8 V.
- Velocidade de soldagem – 43 cm/min.
- Peso do arame após a soldagem - 18,115 Kg.

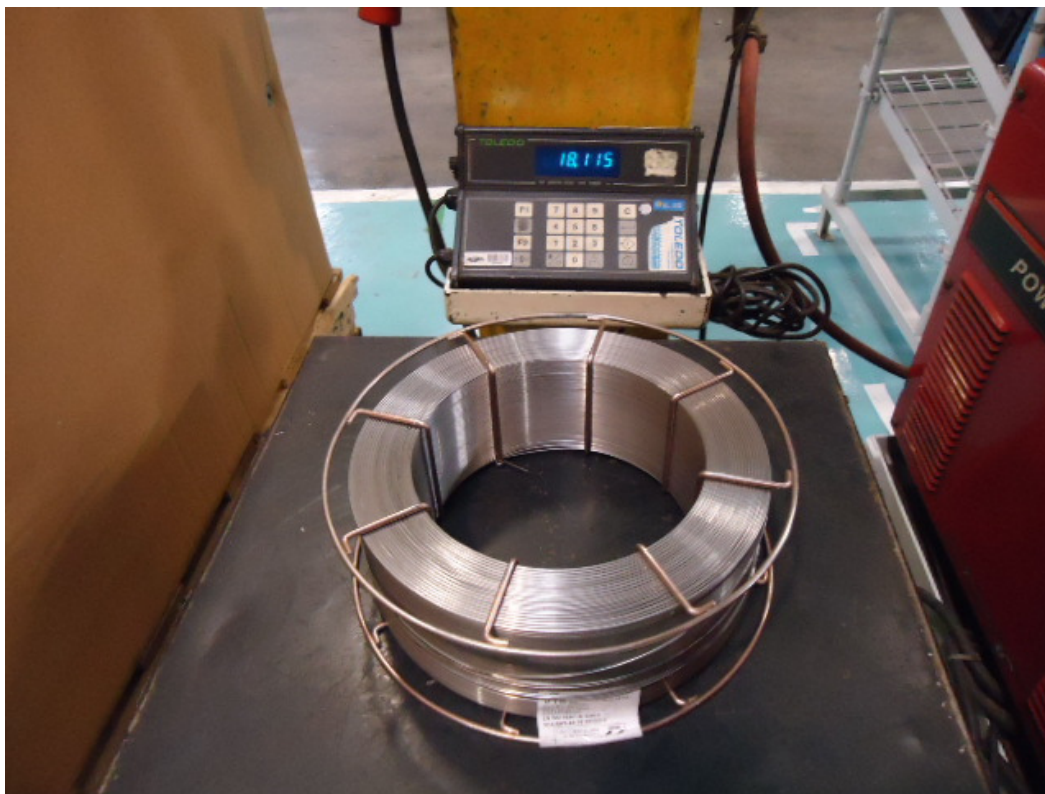


Figura 4.13 – Arame após a soldagem com mistura 25% CO₂

- Peso da chapa após a soldagem - 12,900 Kg.



Figura 4.14 – Chapa após a soldagem com mistura 25% CO_2



Figura 4.15 – Chapa teste soldada com mistura 25% CO_2

4.3.2 Teste 02 – 20% CO_2

Para a soldagem da chapa teste 02 com gás de proteção de composição 20% CO_2 – 80% Ar, os dados coletados foram;

- Peso do arame antes da soldagem - 18,115 Kg.

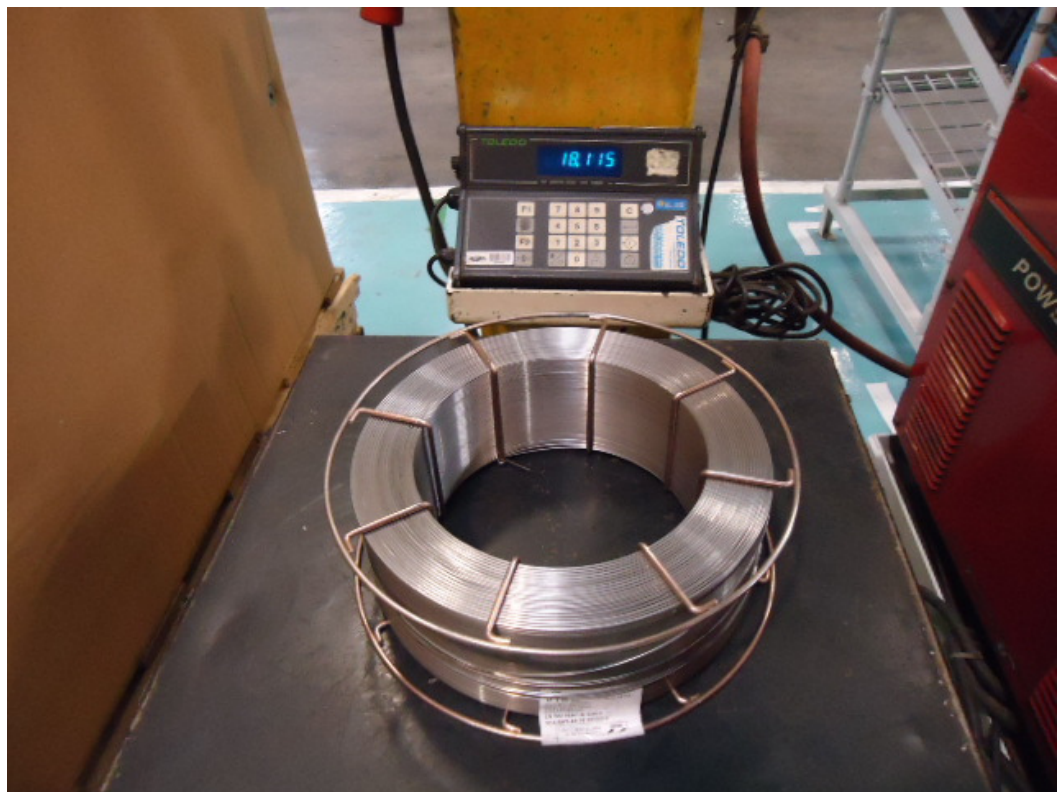


Figura 4.16 – Arame antes da soldagem com mistura 20% CO₂

- Peso da chapa antes da soldagem - 12,830 Kg.

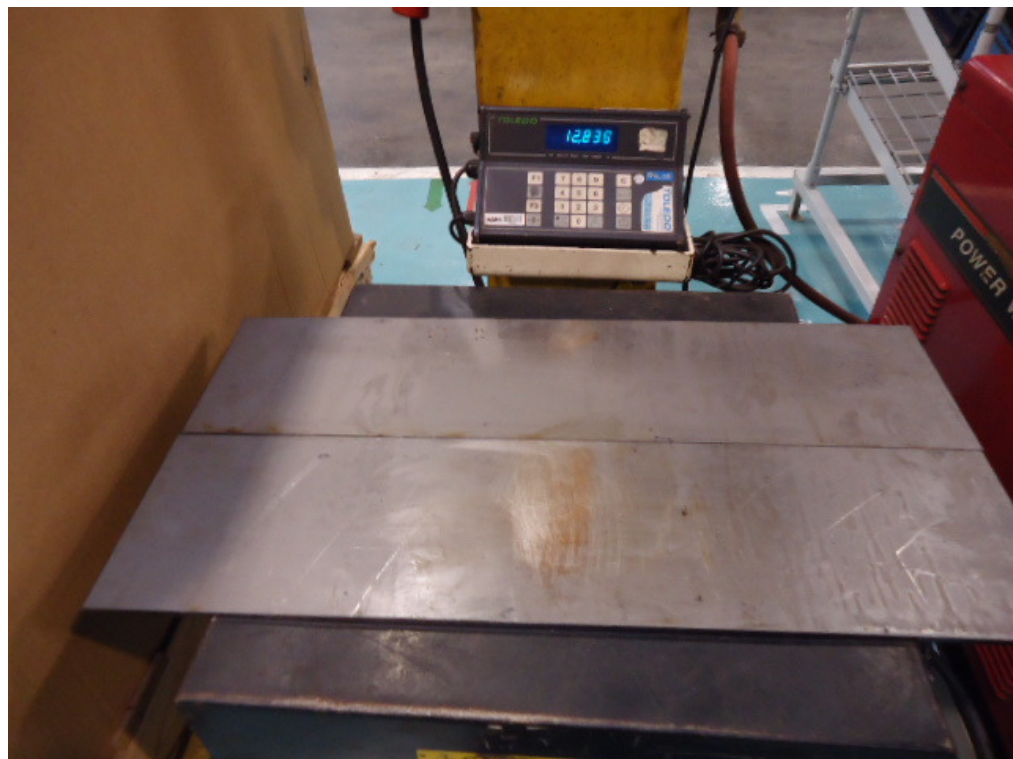


Figura 4.17 – Chapa antes da soldagem com mistura 20% CO₂

- Corrente de soldagem – 254 A.

- Tensão de soldagem – 25,6 V.
- Velocidade de soldagem – 44 cm/min.
- Peso do arame após a soldagem - 18,015 Kg.



Figura 4.18 – Arame após a soldagem com mistura 20% CO₂

- Peso da chapa após a soldagem - 12,920 Kg.

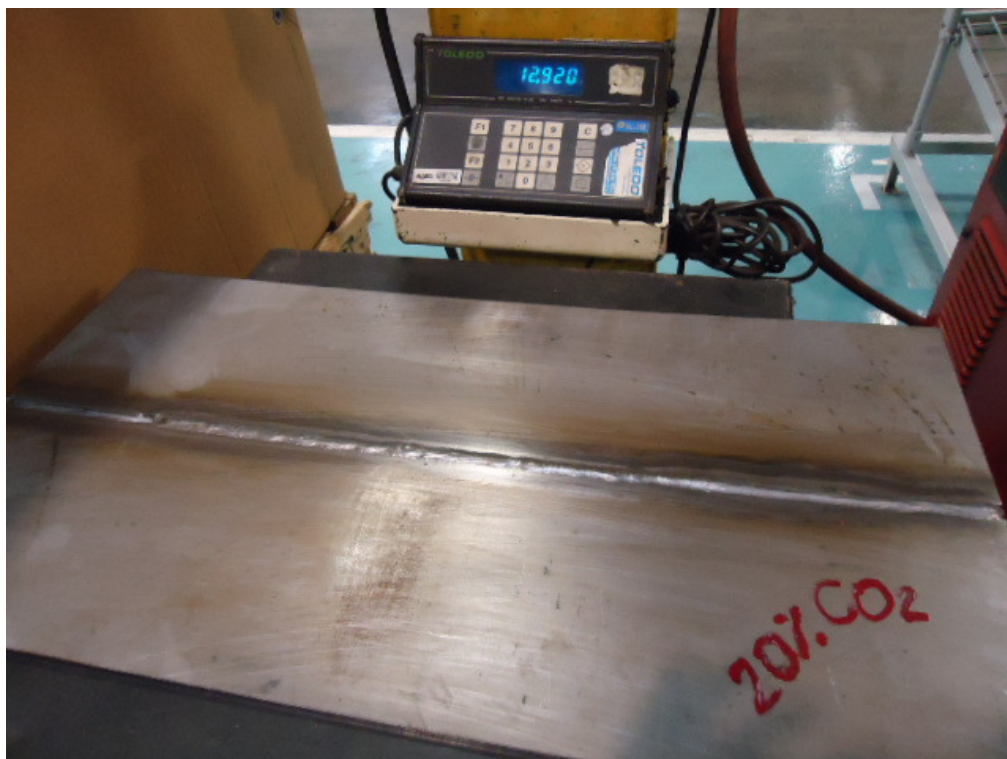


Figura 4.19 – Chapa após a soldagem com mistura 20% CO₂

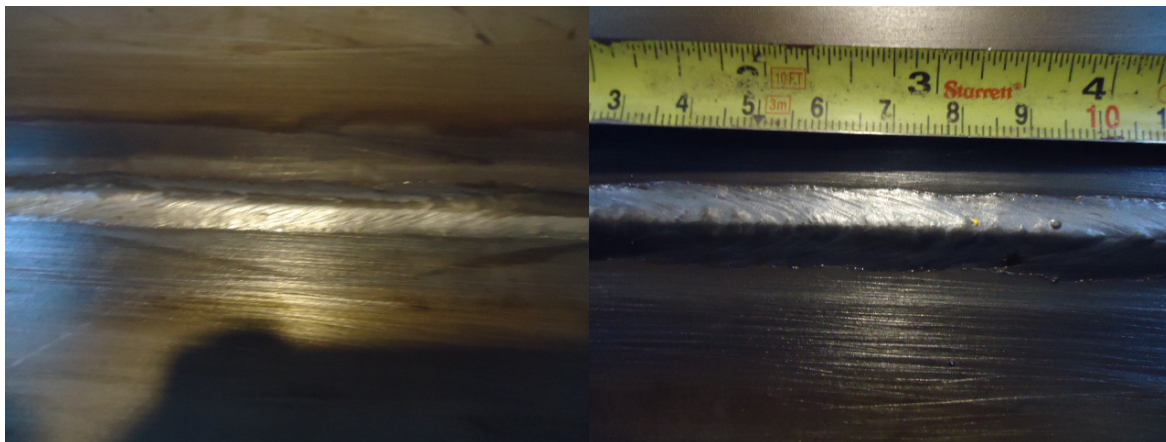


Figura 4.20 – Chapa teste soldada com mistura 20% CO_2

4.3.3 Teste 03 – 15% CO_2

Para a soldagem da chapa teste 03 com gás de proteção de composição 15% CO_2 – 85% Ar, os dados coletados foram;

- Peso do arame antes da soldagem - 18,015 Kg.



Figura 4.21 – Arame antes da soldagem com mistura 15% CO_2

- Peso da chapa antes da soldagem - 12,850 Kg.

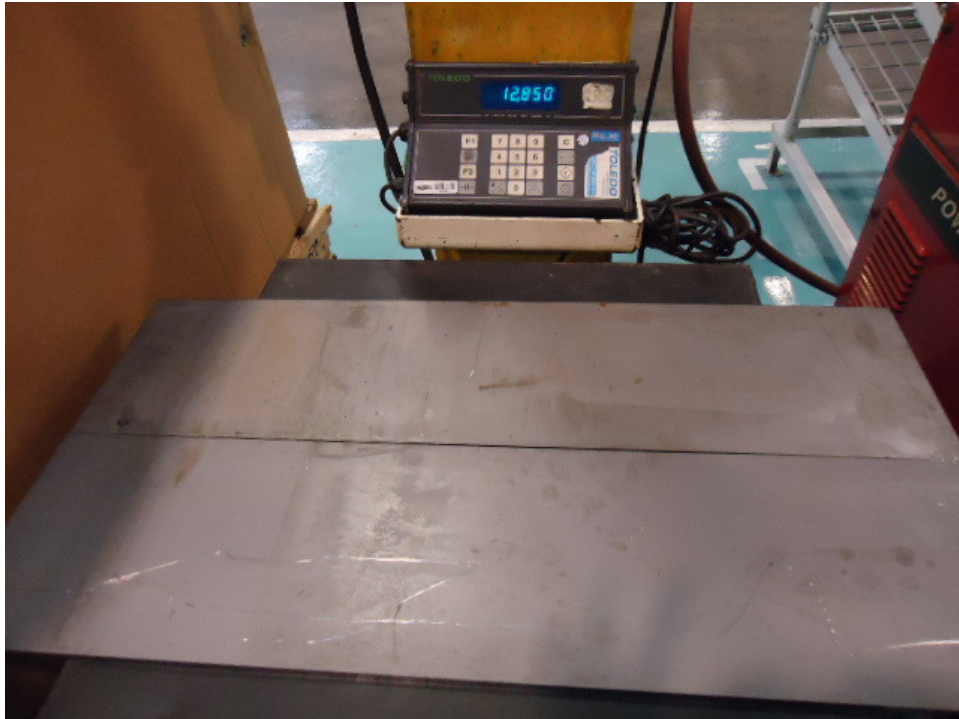


Figura 4.22 – Chapa antes da soldagem com mistura 15% CO₂

- Corrente de soldagem – 252 A.
- Tensão de soldagem – 26,1 V.
- Velocidade de soldagem – 48 cm/min.
- Peso do arame após a soldagem - 17,915 Kg.

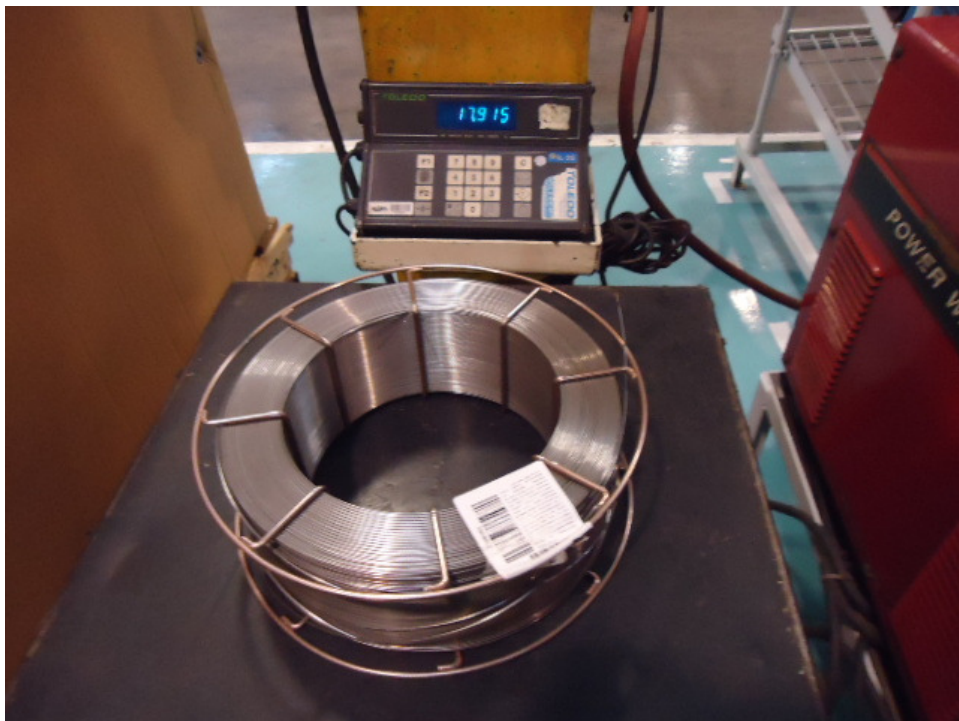


Figura 4.23 – Arame após a soldagem com mistura 15% CO₂

- Peso da chapa após a soldagem - 12,925 Kg.

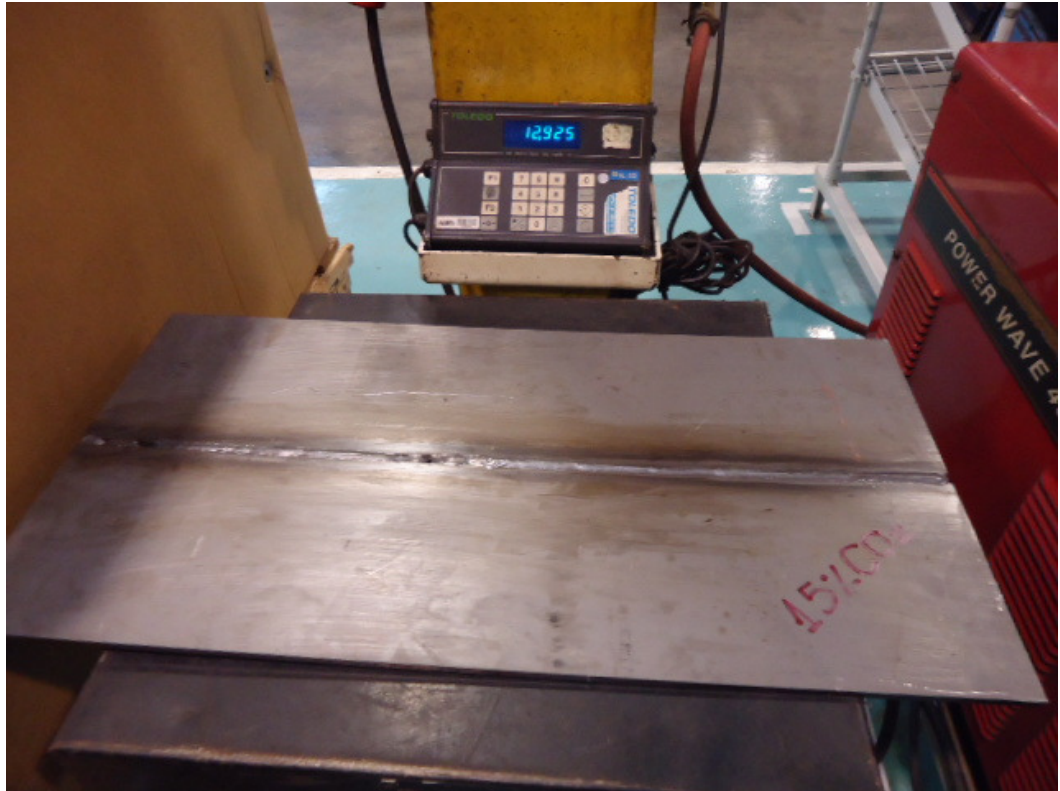


Figura 4.24 – Chapa após a soldagem com mistura 15% CO_2

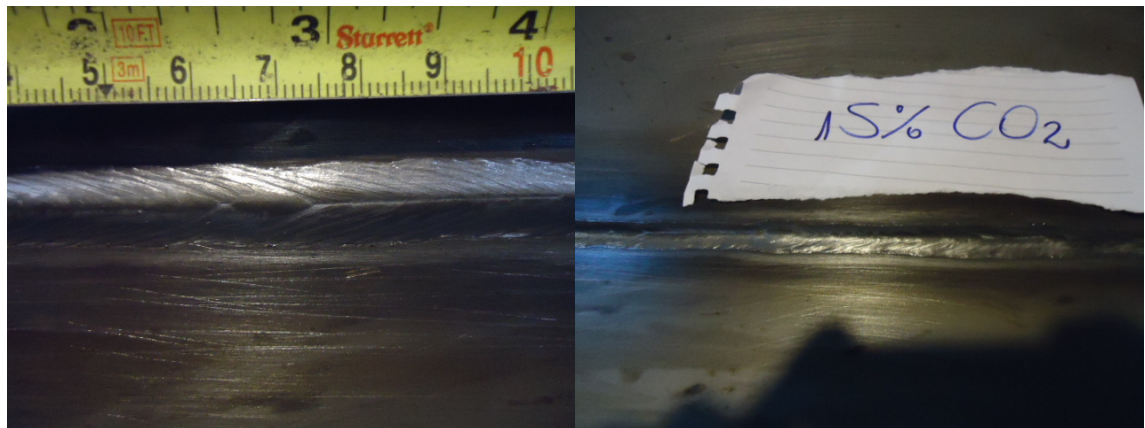


Figura 4.25 – Chapa teste soldada com mistura 15% CO_2

4.3.4 Teste 04 – 10% CO_2

Para a soldagem da chapa teste 04 com gás de proteção de composição 15% CO_2 – 85% Ar, os dados coletados foram;

- Peso do arame antes da soldagem - 17,915 Kg.



Figura 4.26 – Arame antes da soldagem com mistura 10% CO₂

- Peso da chapa antes da soldagem - 12,845 Kg.



Figura 4.27 – Chapa antes da soldagem com mistura 10% CO₂

- Corrente de soldagem – 251 A.
- Tensão de soldagem – 25,7 V.
- Velocidade de soldagem – 46 cm/min.
- Peso do arame após a soldagem - 17,835 Kg.

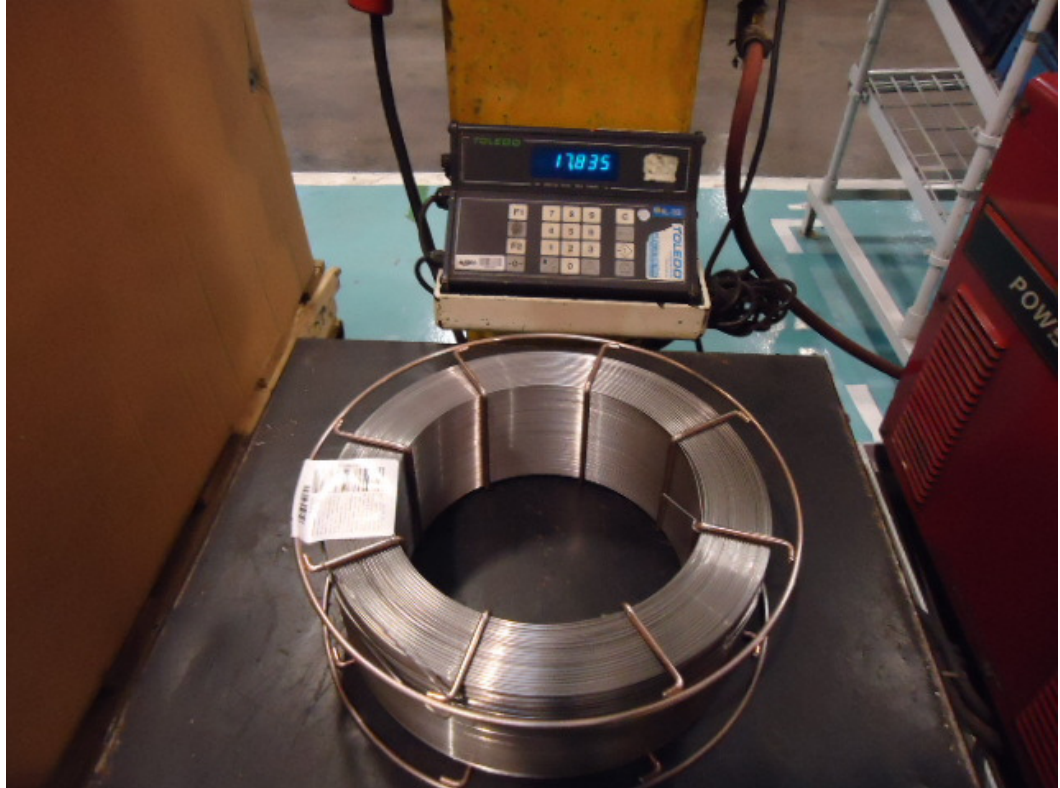


Figura 4.28 – Arame após a soldagem com mistura 10% CO₂

- Peso da chapa após a soldagem - 12,925 Kg.

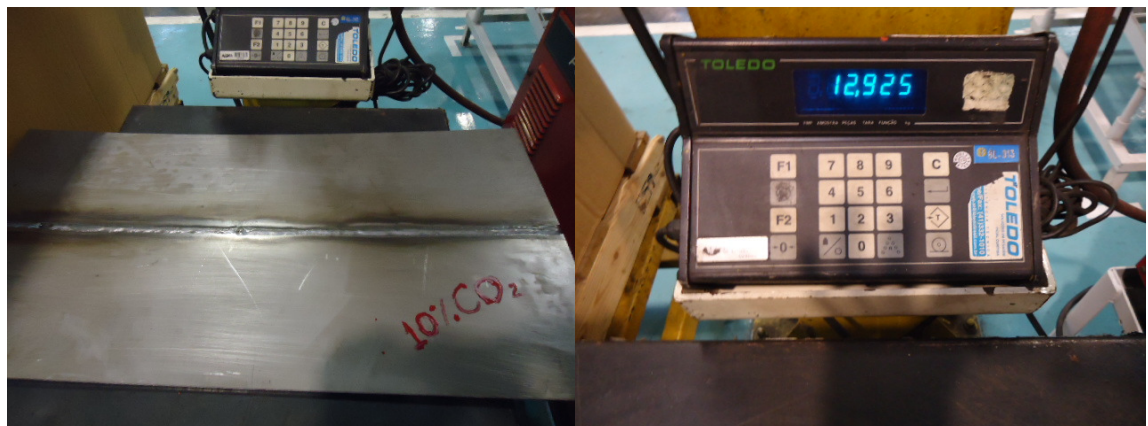


Figura 4.29 – Chapa após a soldagem com mistura 10% CO₂

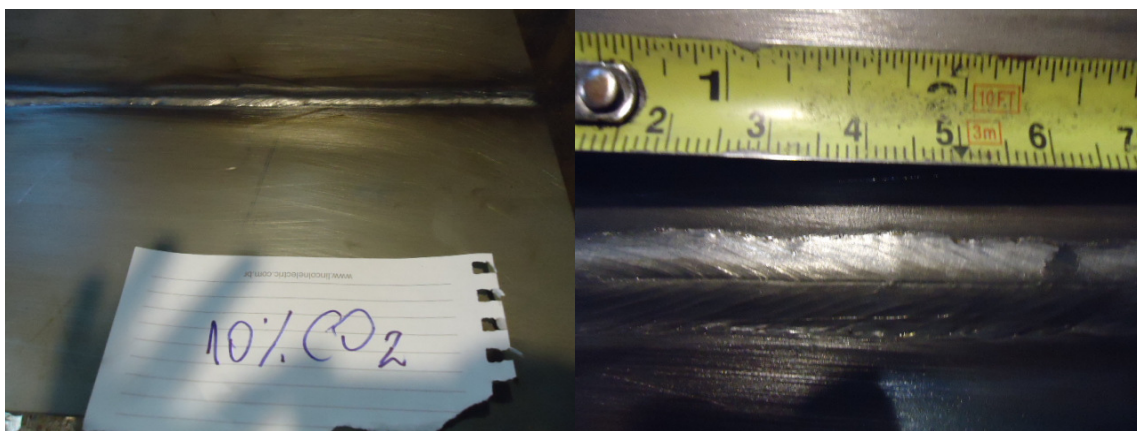


Figura 4.30 – Chapa teste soldada com mistura 10% CO_2

5 RESULTADOS

5.1 MACROGRAFIA

5.1.1 CP 01 – Mistura com 25% CO_2

Observou-se 100% de penetração e ótima área de fusão entre os materiais.

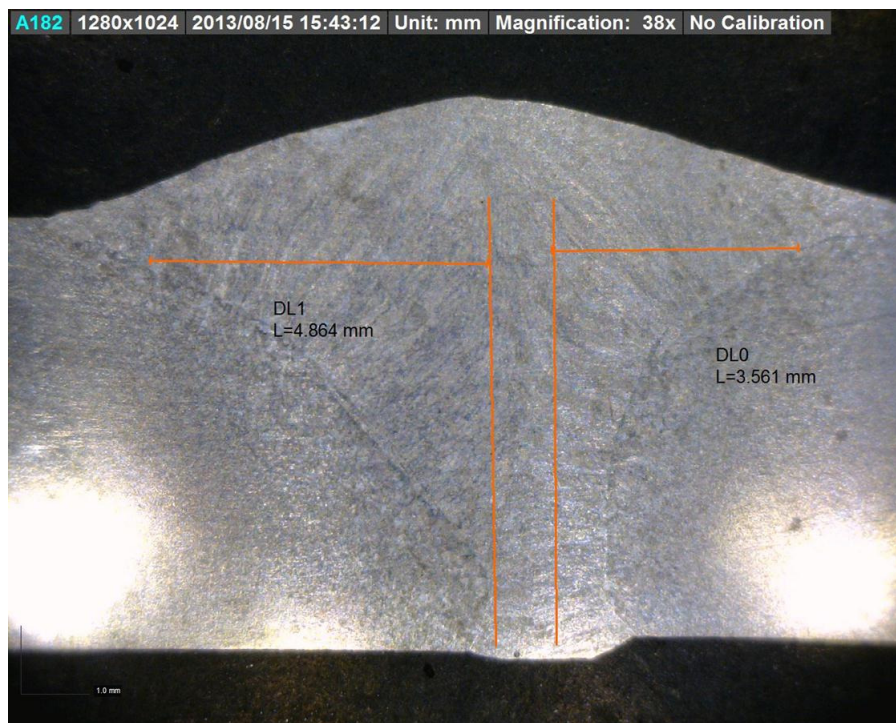


Figura 5.1 – Macrografia CP- 01

5.1.2 CP 02 – Mistura com 20% CO_2

Observou-se 100% de penetração e leve redução na área de fusão entre os materiais comparando-se ao CP-01.

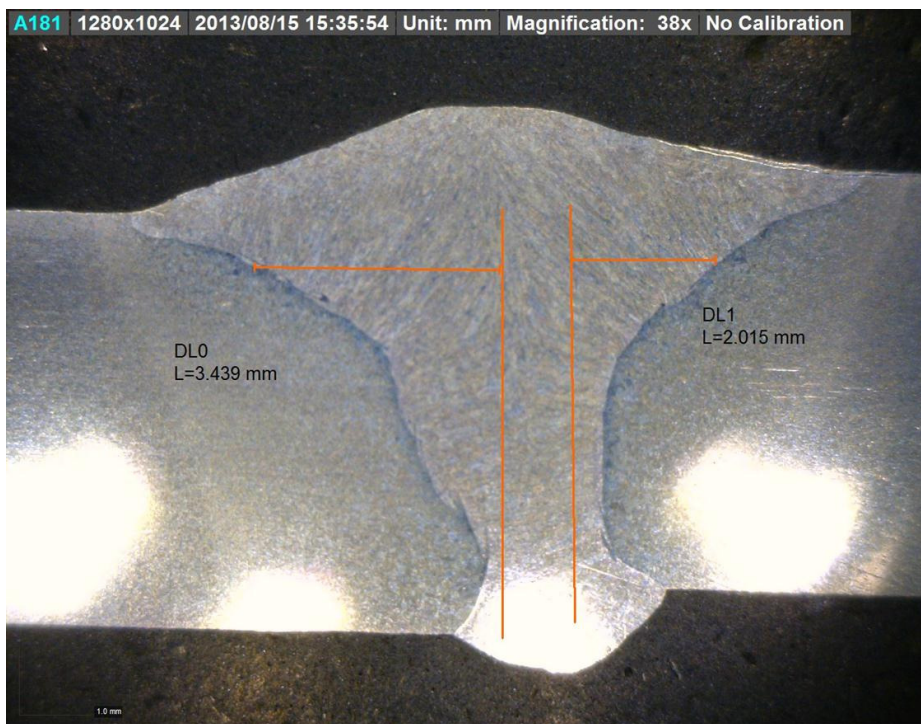


Figura 5.2 – Macrografia CP- 02

5.1.3 CP 03 – Mistura com 15% CO_2

Observou-se 100% de penetração e leve redução na área de fusão entre os materiais comparando-se ao CP-02 e também houve redução na altura do reforço da solda.

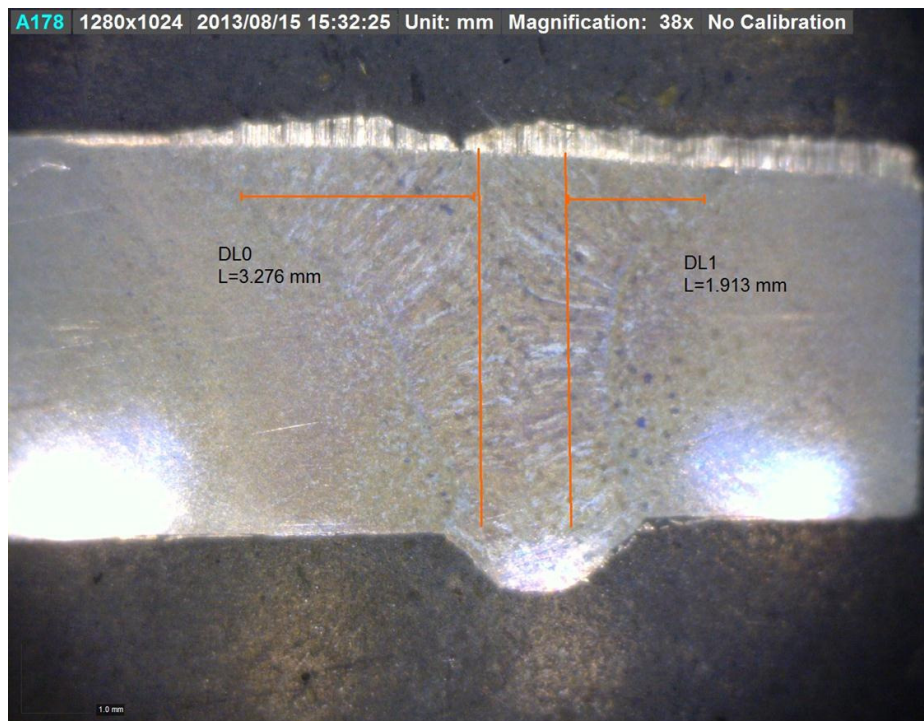


Figura 5.3 – Macrografia CP- 03

5.1.4 CP 04 – Mistura com 10% CO_2

Observou-se que não houve penetração total e aumento na área de fusão entre os materiais comparando-se ao CP-03.

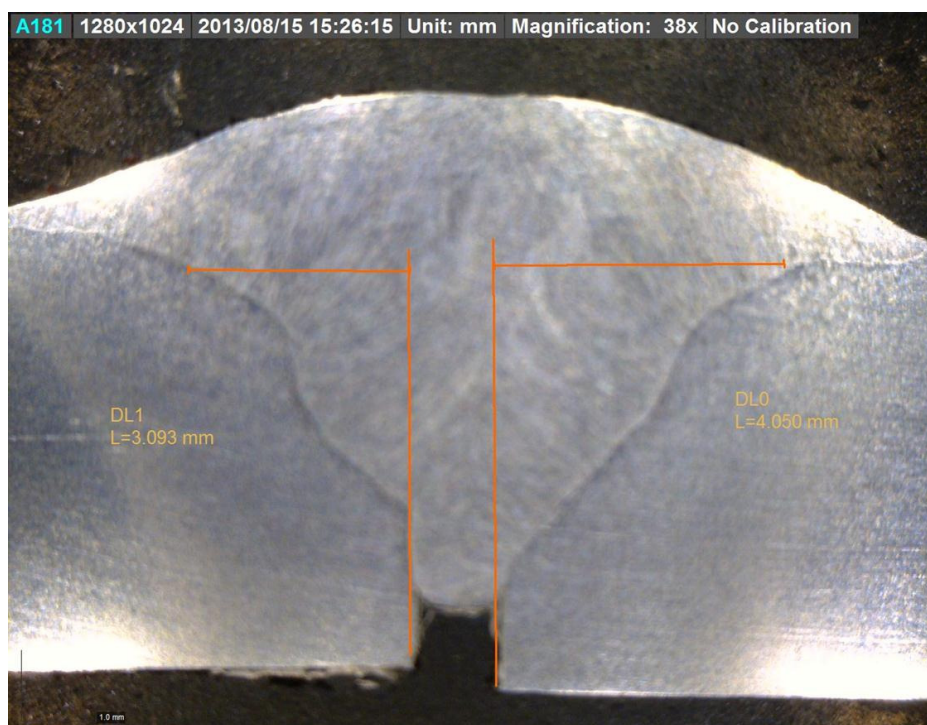


Figura 5.4 – Macrografia CP- 04

5.2 COLETA DE RESPINGOS

A coleta dos respingos foi realizada após a soldagem de cada chapa teste com auxílio de um pincel de cerdas macias. Depois, foram acomodados em recipientes individuais conforme o teor da mistura gasosa utilizada.

Pode se observar a gradativa redução dos respingos proporcionalmente com a redução do teor de dióxido de carbono contido nas misturas do gás de proteção da soldagem e, conseqüentemente, a melhora na eficiência de consumo de arame x material de solda depositado.



Figura 5.5 – Respingos gerados pela soldagem das chapas testes

6 RESULTADOS

O estudo da influência do teor de CO_2 na mistura do gás de proteção em soldagem GMAW pulsado na geração de respingos resultou nas seguintes conclusões.

Com a redução do teor de CO_2 na mistura, o processo pulsado se torna mais estável e há menor geração de respingos, tudo isso devido à baixa condutividade elétrica e maior densidade do dióxido de carbono se comparado ao Argônio. Isso impacta diretamente nos custos de produção de produtos industrializados. Se compararmos os resultados entre o teor de mistura 25% CO_2 e 10% CO_2 , o primeiro teve um grande número de respingos e, conseqüentemente, uma perda do consumível utilizado em relação ao material efetivamente depositado, onde a amostra com mistura de maior teor de dióxido de carbono teve uma perda de 35% e a amostra de menor teor de monóxido de carbono apresentou perda zero.

Através da conclusão deste estudo, aplicou-se o conhecimento adquirido na alteração da mistura do gás de proteção da empresa de equipamentos agrícolas estudada, onde a mistura foi alterada de 25% CO_2 para 10% CO_2 , o que gerou resultados surpreendentes. O tempo de processo de soldagem das peças foi reduzido em média 10% devido à baixa ou nenhuma geração de respingos e, conseqüentemente, o tempo de remoção e limpeza dos mesmos. Essa alteração no processo permitiu que a empresa obtivesse ganhos acima de Um milhão de reais, como é possível observar na figura do Kaizen da alteração abaixo;

CNH FLEXIBILIZA SISTEMA		Planta:	STANDARD KAIZEN							Departamento	SOLDA COLHEITA DEIXAS								
CURTIDA			1	2	3	4	5	6	7	Nr. Projeto	SK-001953/2013								
Título:		GRANDE QUANTIDADE DE RESPIGOS DE SOLDA							Lider	EDENILSON									
Pilar:		<input type="checkbox"/> (S)MMS <input checked="" type="checkbox"/> (P)Quality Control <input checked="" type="checkbox"/> (P)Focus Improvement <input checked="" type="checkbox"/> (L)Qualidade							<input type="checkbox"/> (V)Workplace Organization <input type="checkbox"/> (A)Autonomous Maintenance <input type="checkbox"/> (E)Environment		<input type="checkbox"/> (P)Hygiene Maintenance <input type="checkbox"/> (E)Environment								
Perda Attribuída da Matriz C / Matriz QA		NVA							Perda Attribuída da Matriz C / Matriz QA		NVA								
1. Descrição do problema (SWIH)		2. Esquema / Desenho do fenômeno							3. Soluções e implementações										
O que? GRANDE QUANTIDADE DE RESPIGOS Quando? DURANTE A SOLDA SEM Onde? GRANDE AOS CORPOS DE SOLDA Quem? INDEPENDENTE DAS SOLDADORAS De que forma? 100% DAS SOLDAS REALIZADAS Como? RESPIGOS SÃO EXPULSOS DA BOCA DE FUSÃO Ponto relacionado: NVA Valor da perda identificada:		Esquema / Desenho do fenômeno / SG nº 13056670 Respingos Processo na S/CONJUNTO de FUSÃO 300V							Descrição / Esquema da solução Não há pulso Respingos e Estabilidade Meio eletrodo + Estável Gás proteção 20% CO ₂ + 80% Ar										
4. Definição da(s) causa(s) (Brainstorming, Causa e Efeito, 5 Porquês)		5. Determinação dos objetivos							6. Verificação dos resultados										
- GRANDES QUANTIDADES DE RESPIGOS Por que? - Modo de TRANSFERÊNCIA METÁLICA Por que? - MISTURA DE GÁS UTILIZADA NÃO PERMITE ESTABILIDADE DO MODO PULSADO Por que? - MISTURA DE GÁS ACIMA DE 20% CO ₂ NÃO PERMITE O PULSO UNIFORME Por que? - MODELO DE IONIZAÇÃO DO ARCO CONDIÇÃO O PULSO INSTABILIZANDO O ARCO ELÉTRICO, ALTERNANDO DE MODO DE TRANSFERÊNCIA DE SPRAY → SOLUÇÃO - REDUÇÃO DO TEOR DE CO ₂ NA MISTURA DE 10%, SEM PERMETER A TRANSFERÊNCIA DE SOLDA		Redução de tempo de respingos Redução de grande quantidade de respingos Redução do tempo de limpeza da peça							Responsável pela implementação: EDENILSON BOTELHO Data prevista: 07/01/13 Custo da solução: R\$ 8.900,00										
7. Padronização do resultado		8. Verificação dos resultados							9. Resultados										
Ação requerida para garantir que o novo padrão seja mantido: → Manter e adquirir máquinas que permitam o processo pulsado Algumas ações adicionais são necessárias para o atingimento pleno do objetivo? Máquinas que permitam pulso Esta solução pode ser aplicada em algum outro processo/posto/máquina?		Ação requerida para garantir que o novo padrão seja mantido: → Manter e adquirir máquinas que permitam o processo pulsado							Após implantação Gráfico de barras mostrando a redução de respingos em JAN e FEV.										
Ferramentas		4M		5W1H		Eixos		FMEA		NVA		Poka Yoke		Matriz CM		SMED		Matriz X	
Time do projeto		AM		5		Class ABC		Kanban		OP		Matriz QA		Selo Sigma		VSM		Cursos	
Data Início		09/11/2012		Data Término		07/01/2013		Custos		R\$ 8.900,00		Benefícios		R\$ 1042.200,00		Resultados		R\$ 1033.400,00	
Verificação		118,43																	

Figura 6.1 – Kaizen realizado após o estudo

Foi necessário alterar alguns parâmetros de processo (tensão e corrente) para que esta mudança não afetasse a penetração da solda, pois como o observado neste trabalho, a soldagem com 10% de CO₂ não obteve penetração total devido a manutenção dos parâmetros de soldagem nos testes com diferentes teores de dióxido de carbono na mistura do gás de proteção. Logo, isso se fez necessário para que a qualidade da soldagem não fosse afetada.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e conclusivos, geraram expectativas futuras para novos estudos e aplicações de alterações nos processos de soldagem GMAW- Pulsado, visando reduzir os custos produtivos, melhorando ou mantendo a qualidade de soldagem, tornando, assim, as empresas mais competitivas no mercado industrial.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas pesquisas que foram realizadas e nos resultados obtidos neste trabalho, observaram-se oportunidades para desenvolvimento de novos trabalhos e pesquisas como segue:

- Realizar estudo de influência do teor de monóxido de carbono na mistura gasosa de proteção para soldagem de arames Metal – Core no processo pulsado.
- Verificar também o comportamento e geração de respingos para processo GMAW-P com misturas ternárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir – Soldagem MIG/MAG : Melhor entendimento, melhor desempenho – São Paulo: Artliber 2008.

FISCHER, Alexander – Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW – Arco Pulsado. Dissertação de Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Concentração de Processos de Fabricação – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte – MG – 2011.

GUILE, A.: Electric arcs - Their electrode processes and engineering applications , EIEE Proceedings, Part A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews (ISSN 0143-702X), vol. 131, pt. A, no. 7, Sept. 1984, p. 450-480.

SHELLHASE, M.: Der Lichtbogen – ein technologisches Werkzeug, DVS – Verlag, Düsseldorf, 1985.

MATTHES, K.-J.; RICHTER, E.: Schweißtechnik. 2. Auflage Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. – ISBN 3-446 22046-1

EBAH – Disponível em www.ebah.com.br/content/ABAAAAvN4AD/mig-mag, acessado em 31 de maio de 2013.

ABS – Soldagem GMAW – Ensino ABS, disponível em <http://www.abs-soldagem.org.br/>, acessado em 31 de maio de 2013.

PUSCHNER, P. : Konventionelle und elektronische Schweißenergiequellen Bauarten, statische und dynamische Eigenschaften und Wirkungsweise, DVS – Berichte, Band 105 (1986), p.193- 195